

Neue Bezeichnung: INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

30-0029/4-001

B I B L I O T H E K

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens  
infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen  
unter Brandbeanspruchung

- Teil IV -

Bericht erstattet

von

Dipl.-Ing. Lore Krampf

Oktober 1980

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Innenministeriums  
des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB1 - 72.02 - 41/78)  
durchgeführt.

Postsendungen:  
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig  
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 22 81

Fernschreiber: 9 52 698 lbstb d  
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

<http://publikationsserver.tu-braunschweig.de/get/64358>

# I n h a l t

	Seite
1. <u>Allgemeines, Zweck der Untersuchungen</u> . . . . .	1
2. <u>Versuchsplanung und Vorbereitung</u> . . . . .	2
2.1    Versuchskörper . . . . .	2
2.1.1   Auswahl, Konstruktion und Abmessungen . . . . .	2
2.1.2   Baustoffe . . . . .	7
2.1.3   Meßquerschnitte . . . . .	8
2.1.4   Lagerung und Trocknung . . . . .	8
3. <u>Versuchsaufbau und -durchführung</u> . . . . .	8
3.1    Brandraum und Beheizung . . . . .	8
3.2    Einbau und Belastung der Prüfkörper . . . . .	8
3.3    Meßprogramm . . . . .	9
3.3.1   Messung der Brandraumtemperatur . . . . .	9
3.3.2   Messung der Temperatur der Biegezugbewehrung . . . . .	9
3.3.3   Messung der Temperatur der Umschließungsbügel . . . . .	9
3.3.4   Messung der Temperatur der Schubzulagen . . . . .	10
3.3.5   Messung der vertikalen Verformung . . . . .	10
3.4    Sonstige Beobachtungen. . . . .	10
4. <u>Versuchsergebnisse</u> . . . . .	10
4.1    Brandraumtemperatur . . . . .	10
4.2    Temperatur der Biegezugbewehrung . . . . .	11
4.3    Bügeltemperatur . . . . .	11
4.4    Temperatur der Schubzulagen . . . . .	11
4.5    Vertikalverformung. . . . .	11
4.6    Sonstige Beobachtungen. . . . .	12
4.6.1   Versuchskörper 1. . . . .	12
4.6.2   "                   2. . . . .	13
4.6.3   "                   3. . . . .	15
4.6.4   "                   4. . . . .	16
4.6.5   "                   5. . . . .	18
4.6.6   "                   6. . . . .	19
4.6.7   "                   7. . . . .	21
4.6.8   "                   8. . . . .	23
5. <u>Diskussion der Versuchsergebnisse</u> . . . . .	25
5.1    Durchlaufsysteme. . . . .	25
5.1.1   Diskussion der Schubbruch-Phänomene . . . . .	26
5.2    Einfeldbalken. . . . .	29
6. <u>Zusammenfassung und Schlußbemerkungen</u> . . . . .	30
<u>Literatur</u> . . . . .	32
<u>Verzeichnis der Anlagen</u> . . . . .	33
Anlagen	

## 1. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig führte in den vergangenen Jahren im Auftrag des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Schubversagens von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung durch. Über das Verhalten von Balken, deren Schubbewehrung aus herkömmlichen Umschließungsbügeln bestand, wurde im Oktober 1979 berichtet (Teil I bis III des Untersuchungsvorhabens [1]).

Nach DIN 1045, Ausgabe 1978 [2], Abschnitt 18.8 ist es zulässig, einen Teil der Umschließungsbügel durch Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartige Schubbewehrungselemente, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", zu ersetzen. Das Verhalten solcher Balken unter Brandangriff war nicht aufgrund reiner Überlegungen abzuschätzen, sondern mußte experimentell überprüft werden. Mit dieser Frage beschäftigt sich der hier vorgelegte Bericht.

Zwar werden die Schubzulagen im Innern des Betonquerschnitts angeordnet und sind so relativ lange vor hohen Temperaturen geschützt, doch erfolgt die Einleitung der Schubkräfte nahe dem unteren Querschnittsrand über einen Längsstab, der in den Querschnittsbereichen liegt, die bei Brandeinwirkung frühzeitig Zerstörungen des Betongefüges zeigen, wodurch der Verbund zwischen Stahl und Beton beeinträchtigt wird.

Ob die vergleichsweise guten Verbundeigenschaften gerippter Stäbe, aus welchen ja die Schubleitern hergestellt werden, trotzdem noch ausreichen, die Verankerung in der Biegezugzone bzw. im unteren Querschnittsbereich des Balkens sicherzustellen, war zu untersuchen.

Die schiefen Beton-Druckstreben stützen sich gegen die Ecken der Umschließungsbügel ab. Es mußte geprüft werden, ob bei der durch die Schubleitern veränderten Konfiguration der inneren Kräfte die drastisch verringerten Umschließungsbügel, deren untere Ecken zudem extrem erwärmt und in ihrer Festigkeit gemindert werden, in der Lage sind, schräg nach außen wirkende Spreizkräfte ausreichend lange aufzunehmen.

Diese offenen Fragen führten zu einem Forschungsprojekt, das ein Experimentalprogramm von sechs Balken unter Normbrandbeanspruchung vorsah. Nachdem es die äußerst sparsam eingesetzten bereitgestellten Mittel erlaubten, wurde die Serie durch zwei weitere Versuche ergänzt.

## 2. Versuchsplanung und -vorbereitung

### 2.1 Versuchskörper

#### 2.1.1 Auswahl, Konstruktion und Abmessungen

Für die Untersuchungen wurden acht Prüfkörper hergestellt. Eine Zusammenstellung ist in Tabelle 1 gegeben. Prüfkörper 1 - 7 dienten zur Bearbeitung der gleichen Fragestellung, während mit Prüfkörper 8 ein Sonderproblem untersucht wurde. Er wird daher am Ende dieses Abschnitts behandelt, und die folgenden Ausführungen gelten zunächst nur für die Balken 1 - 7.

Schubzulagen, d.h. korb-, leiter- oder girlandenartige Schubbewehrungselemente, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen, sind nach DIN 1045, Abschnitt 18.8.4, Ausgabe 1978, unbeschränkt zulässig, sofern mindestens 25 % <sup>+)</sup>  der rechnerischen Schubspannung  $\tau_0$  durch Umschließungsbügel abgedeckt werden. Im Sinne der hier vorliegenden Aufgabe waren daher zunächst Prüfkörper zu entwerfen, deren Querschnittsabmessungen den Mindestforderungen für eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse gemäß DIN 4102 Teil 2 [4] entsprachen und deren Schubbewehrung zum höchstzulässigen Anteil aus Schubzulagen bestand, auch wenn das zu praktisch nicht brauchbaren Ausführungen zwang.

Als anzustrebende Feuerwiderstandsklasse wurde F 90 festgelegt, wofür nach DIN 4102 Teil 4 [4] eine Mindestbalkenbreite von 150 mm erforderlich ist. Die Biegezugbewehrung wurde so angeordnet, daß sie den Forderungen des genannten Normteils für F 90 entsprach.

Nachdem sich bei den ersten Versuchen herausstellte, daß bei kleinstmöglichen Balkenabmessungen (DIN 4102) und gleichzeitig größtmög-

---

<sup>+)</sup>  Im Manuskript der Neufassung Abschnitt 18 [3] betrug der Mindestanteil 20 %; danach wurde der Versuchskörper 2 bemessen.



lichem Schubzulagenanteil (DIN 1045) die angestrebte Feuerwiderstandsdauer bei weitem nicht erreicht wurde, mußten sowohl Balkenbreite wie Schubzulagenanteil variiert werden.

Als Typ der Schubzulagen wurden "Leitern" aus Betonstahlmatten gewählt.

Durchlaufträger sind anfälliger gegen Schubversagen unter Brandbeanspruchung als Einfeldsysteme. Die Behinderung der Durchbiegung, die durch die von Balkenunterseite bis Oberseite abnehmende Temperaturdehnung hervorgerufen wird, erzeugt Zwangmomente, die die Stützbereiche zusätzlich beanspruchen. Damit verbunden ist ein Anwachsen der Querkraft und der Schubspannungen im Bereich der Zwischenstützen. Dabei stellen Zweifeldbalken den ungünstigsten Fall von Durchlaufträgern dar; sie erleiden im Brandfall beim Anwachsen des Stützmomentes gleichzeitig den größtmöglichen Querkraftzuwachs im gleichen Bereich. Die Prüfkörper 1 - 7 wurden daher als symmetrische Zweifeldbalken ausgebildet.

Bei Balken in Raumtemperatur wurde für Momenten-Schubverhältnisse  $M/Q \cdot h \sim 2,5 - 3,0$  (Gebrauchszustand) bei Untersuchung aller Parameter ein Minimum des Verhältnisses  $M_{\text{eff}}/M_{\text{Bu}}$  ermittelt, wobei  $M_{\text{eff}}$  das effektive Moment beim Schubversagen und  $M_{\text{Bu}}$  das rechnerische Biegebruchmoment bedeutet (z.B. [5]). In Teil I - III der Untersuchungen über das Schubverhalten im Feuer wurde nicht beobachtet, daß andere Momenten-Schubverhältnisse ungünstigere Ergebnisse brachten. Daher wurden alle jetzt untersuchten Balken als Einzellastsysteme für  $M/Q \cdot h = 3,0$  ausgelegt, wobei M und Q die Schnittgrößen im Gebrauchszustand über der Mittelstütze sind.

Die Schubbeanspruchung der Prüfkörper lag im Schubbereich 2 gemäß DIN 1045, wobei entsprechend dem Rechenwert der Schubspannung der Schubdeckungsgrad abgemindert wurde, und an der oberen Grenze des Schubbereichs 3, der Schubbereich 1 wurde nicht untersucht.

Bei den im Schubbereich 3 liegenden Balken mußte eine Abweichung gegenüber der in DIN 1045 geforderten Mindestbalkendicke  $d_0 = 450 \text{ mm}$  in Kauf genommen werden, da die Kapazitätsgrenze der Prüfeinrichtung

erreicht war. Es wurde für vertretbar erachtet, in diesen Fällen mit  $d_o = 400$  mm zu arbeiten. In Tabelle 1 sind die untersuchten Balkensysteme zusammengestellt.

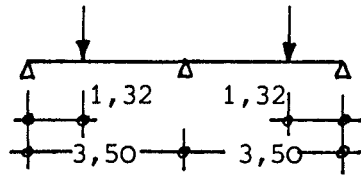
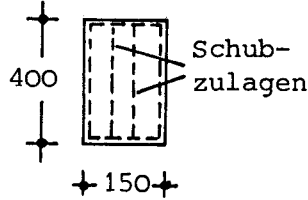
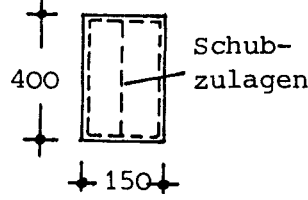
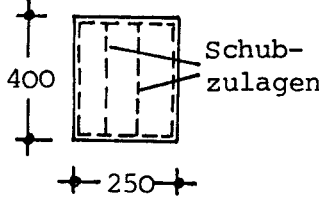
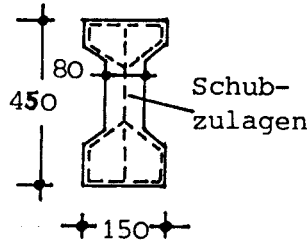
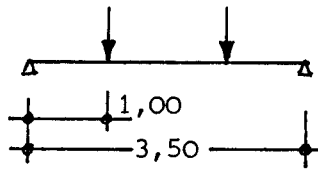
Die Biegezugbewehrung in den Balkenfeldern wurde soweit wie möglich nach der Zugkraftdeckungsline gestaffelt, wobei die nicht mehr benötigten Stäbe stumpf endeten.

Die Stützbewehrung wurde, wie es in DIN 4102 Teil 4 (E) gefordert wird, jeweils um 0,15 l gegenüber der "Normalbemessung" verlängert und endete danach gestaffelt; ihr Querschnitt wurde nicht vergrößert.

Nach DIN 1045, Abschnitt 18.8.3 dürfen bei feingliedrigen Fertigteilträgern mit Stegbreiten  $b_o \leq 80$  mm auch einschnittige Schubzulagen allein als Schubbewehrung verwendet werden, wenn die Druckzone und die Biegezugbewehrung entsprechend gesichert sind. Über die Zulässigkeit dieser Bewehrungsvariante im Hinblick auf das Brandverhalten wurden durch den Prüfkörper 8 Informationen erwartet. Es wurde ein Einfeldbalken mit I-Querschnitt gewählt, dessen Stegdicke  $t = 80$  mm betrug. Dieser Querschnitt ist mit Normalverbügelung für die Feuerwiderstandsklasse F 30 zulässig.

In Tabelle 2 sind die statischen und konstruktiven Daten der Prüfkörper zusammengestellt; als Anlagen 1.1 - 1.8 sind die Bewehrungspläne der Balken beigelegt. Es wird darauf aufmerksam gemacht, daß bei den Zugkraftdeckungslinien der geringfügige Einfluß des Balkeneigengewichts auf den Verlauf (parabelförmige Ausrundung) vernachlässigt wurde.

Tabelle 1: Zusammenstellung der untersuchten Balkensysteme

allgemeine Angaben	Ver-such Nr.	Querschnitt	System	Beton	Schubbereich	Schub-spannung $\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )	Schub-deckungs-grad $\eta$	Verhältnis Umschl.-Bgl. /Schubzulage	Feuerwider-standsdauer (min)	
direkte Lagerung  Mittelaufleger und ein End-aufleger ungeschützt im Feuer (Mörtelbett)  Biegezug-bewehrung im Feld gestaffelt  Stahl: Biegezug-bewehrung und Umschließungs-bügel St 420/500 RK, Schubzulagen St 500/550 RK	1	b/d = 150/400	 $\frac{M}{Q \cdot h} \sim 3,0$	B 25	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	2,8	1,0	1,0/0	95	
	2			B 25	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	2,8	1,0	0,2/0,8 +)	26	
	3			B 25	$\tau_{o12} < \tau_o < \tau_{o2}$	1,2	0,67	0,6/0,4	72	
	4			B 15	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	1,7	1,0	0,4/0,6	32	
	5			B 25	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	2,8	1,0	0,6/0,4	96	
	6			B 25	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	2,8	1,0	0,3/0,7	87	
	7			B 15	$\tau_o \sim \tau_{o3}$	1,7	1,0	0,25/0,75	73	
	8		 $\frac{M}{Q \cdot h} = 2,4$	B 25	$\tau_o = \tau_{o3}$	3,0	1,0	0/1,0 (im Steg)	57	

+) Der geringe Anteil der Umschließungsbügel war nach dem Manuskript der Neufassung von DIN 1045, Abschn. 18 zulässig.

Tabelle 2: Statische und konstruktive Daten der Prüfkörper

Nr.	System	Belastung	Stütz- weite	Nutz- last	Last- stellg.	M/Q·h	Biegemoment		maßgeb. Quer- kraft	Beton- druck- festig- keit $f_{ct}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Stahlgüte	Querschnitt				maßgeb. Schub- spanng.	Schub- bereich	Schub- deckungs- grad $\eta$	Schubbewehrung				Längsbewehrung				Feuerwider- standsdauer (min)
			$l$ (m)	$P$ (kN)	$a$ (m)		$M_{Feld}$ (kNm)	$M_{Stütz}$ (kNm)	$Q$ (kN)			(mm)				$\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )			$\phi$	$e$ (mm)	BStG	Bügel/ Leitern	$A_{S_{Feld}}$	$A'_{S_{Feld}}$	$A_{S_{Stütze}}$	$A'_{S_{Stütze}}$	
1	Zwei- feld	Einzel- lasten	3,50	228,2	2,18	3,0	140,0	132,0	127,0	41,4 <sup>1)</sup>	420/500	150	400	350	300	2,8	3	1,0	10	90		1,0/0	2 Ø 22 2 Ø 28	2 Ø 28	2 Ø 22 2 Ø 28	2 Ø 28	95
2	"	"	3,50	228,2	2,18	3,0	140,0	132,0	127,0	28,3	420/500	150	400	350	300	2,8	3	1,0	6	150	2 K 664	0,20/0,80 <sup>2)</sup>	2 Ø 22 2 Ø 25	2 Ø 28	2 Ø 22 2 Ø 28	2 Ø 28	25
3	"	"	3,50	94,0	2,18	3,0	58,4	55,6	54,0	28,3	420/500	150	400	350	300	1,2	2	0,67	6	200	R 221	0,57/0,43	2 Ø 25		2 Ø 25		72
4	"	"	3,50	136,6	2,18	3,0	84,0	79,7	76,8	19,4	420/500	150	400	350	300	1,7	3	1,0	6	140	K 664	0,36/0,62	4 Ø 20	2 Ø 20	4 Ø 20	2 Ø 20	30
5	"	"	3,50	228,2	2,18	3,0	140,0	132,0	127,0	41,4 <sup>1)</sup>	420/500	150	400	350	300	2,8	3	1,0	8	90	R 589	0,61/0,39	2 Ø 22 2 Ø 28	2 Ø 28	2 Ø 22 2 Ø 28	2 Ø 28	95
6	"	"	3,50	384,0	2,18	3,0	235,0	222,0	212,0	41,4 <sup>1)</sup>	420/500	250	400	350	300	2,8	3	1,0	8	110	2 K 884	0,30/0,70	4 Ø 28 2 Ø 25	3 Ø 28	4 Ø 25 2 Ø 22	3 Ø 25	57
7	"	"	3,50	229,0	2,18	3,0	141,0	133,8	128,8	22,0	420/500	250	400	350	300	1,7	3	1,0	6	120	2 R 589	0,26/0,74	3 Ø 25 2 Ø 20	3 Ø 25	4 Ø 25	2 Ø 25	73
8	Ein- feld	"	3,50	84,0	1,0	2,4	85,8		85,5	29,0	420/500	80 <sup>3)</sup>	450	410	350	3,0	3	1,0			K 884	0/1,0 <sup>4)</sup>	2 Ø 28				57

1) angestrebte Betonfestigkeitsklasse deutlich überschritten  
2) nach DIN 1045, Manuskript der Neufassung, zulässig  
3) I-Querschnitt, vergl. Anlage 1.6  
4) in Steg

### 2.1.2 Baustoffe

Es wurde sowohl Transportbeton wie auch im Institut hergestellter Beton verarbeitet. In allen Fällen handelte es sich um vorwiegend quarzitisches Zuschläge aus Gruben des Braunschweiger Raums und des Vorharzes.

Als Bindemittel wurde Portlandzement PZ 35 F benutzt.

Dem Beton für die Balken 2 und 8 mit besonders enger Bewehrung bzw. schmalen Steg wurde ein Verflüssiger zugesetzt.

Vorgesehen war für alle Versuchskörper kaltverformter Betonstahl. Es ergaben sich jedoch in einigen Fällen Lieferschwierigkeiten, so daß für die Biegezugbewehrung teilweise auf naturharten Stahl (BSt 420/500 RU) ausgewichen wurde, da hieraus keine Beeinflussung des Schubverhaltens zu erwarten war. Für die Umschließungsbügel wurde ausschließlich kaltverformter Stahl BSt 420/500 RK eingesetzt, während die Schubzulagen (Leitern) aus kaltverformtem Stahl BSt 500/500 RK (Baustahlgewebe) bestanden.

Tabelle 3 zeigt stichprobenartig die Kennwerte des Bügelstahls unter Normaltemperatur.

Tabelle 3: Kennwerte des für die Umschließungsbügel verwendeten Betonstahls BSt 420/500 RK

$\varnothing$ (mm)	$\beta_{0,2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta_Z$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta_{10}$ (%)
6	442	511	13,3
6	444	512	13,3
6	442	511	13,3
8	432	511	12,5
8	428	514	15,0
8	439	523	13,8
10	420	502	18,0
10	471	567	18,0
10	471	567	15,0

### 2.1.3 Meßquerschnitte

In allen Balken wurden Fe-Konst.-Thermoelemente an den Bügeln und den Schubleitern, in einigen Fällen auch an der untenliegenden Biegezugbewehrung, einbetoniert zur Messung des Temperatur-Zeit-Verlaufs. Die Lage der Meßstellen ist den Anlagen 3.1-3.8 und 4.2-4.7 zu entnehmen.

### 2.1.4 Lagerung und Trocknung

Die Versuchskörper wurden in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima 20/65 aufwies. Die Lagerungszeit betrug mindestens drei Monate, um eine genügende Austrocknung zu gewährleisten.

## 3. Versuchsaufbau und -durchführung

### 3.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden als obere Abdeckung einer Brandkammer von 4,0 m Breite und 1,7 m Höhe eingebaut. Die Brandkammerlänge war - trotz gleicher Feldweiten der Durchlaufbalken - unterschiedlich, da jeweils ein Endauflager dem direkten Flammenangriff ausgesetzt wurde. Die nicht vom Prüfkörper überdeckte Restfläche der Kammer war mit Gasbetonplatten abgedeckt. Die innere Ausmauerung dreier Brandraumwände und des Bodens bestand aus Hartschamotte, während die vierte - nicht ortsfeste - Wand und bei den Durchlaufbalken auch das Mittelaufleger mit Gasbetonplatten bekleidet waren.

Die Beheizung erfolgte bei den Durchlaufbalken 1-7 durch je 5 und bei dem Einfeldbalken Nr. 8 durch je 3 Ölbrenner an den beiden Längsseiten unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 bzw. ISO St. 834. Die Flammenachsen verliefen horizontal, 0,67 m über dem Brandkammerboden, senkrecht zur Längsachse der Prüfkörper. Die Flammenlänge betrug i.a. etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden des Brandraumes abgesaugt..

### 3.2 Einbau und Belastung der Versuchskörper

Die Versuchsbalken wurden so eingebaut, daß ein Endauflager und bei den Durchlaufbalken auch das Mittelaufleger ungeschützt im Brandraum

waren. Die genannten Auflager waren als Mörtelbett ausgebildet. Das andere Endauflager war ein Rollenlager und lag - gegen übermäßige Erwärmung geschützt - außerhalb des Brandraumes.

Die Belastung wurde durch hydraulische Pressen aufgebracht und während des Versuchs konstant gehalten. Die Belastungsschemata sind Tabelle 1 zu entnehmen, das Prinzip des Versuchsaufbaus ist auf den Anlagen 2.1 und 2.2 dargestellt.

### 3.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte folgende Aufgaben:

#### 3.3.1 Messung der Brandraumtemperatur

Mit NiCr-Ni-Thermoelementen wurde an mindestens 6 Meßstellen (vergl. Anlage 2) die Brandraumtemperatur kontrolliert. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, daß auch im Bereich der ungeschützten Auflager, wo große Wandmassen den Temperaturverlauf beeinflussten, die Temperaturentwicklung verfolgt wurde. Die Messungen dienten gleichzeitig zur Steuerung der Einheitstemperaturzeitkurve.

#### 3.3.2 Messung der Temperatur der Biegezugbewehrung

Zur Messung der Stahltemperatur dienten Fe-Konst.-Thermoelemente an ausgewählten Stäben der Feldbewehrung jeweils in Feldmitte. Die Messungen wurden nicht an jedem Versuchskörper durchgeführt, da die für die Versuchsauswertung wesentlicheren Daten von anderen Messungen zu erwarten waren.

#### 3.3.3 Messung der Temperatur der Umschließungsbügel

Der Anstieg der Bügeltemperatur wurde an den senkrechten Bügelschenkeln in halber Balkenhöhe und an den unteren waagerechten Schenkeln in Balkenmitte durch Fe-Konst.-Thermoelemente gemessen. Ausgehend von dem Bügel über dem Mittelaufleger wurden die Meßstellen an jedem zweiten oder dritten Bügel angebracht, so daß etwa eine halbe Balkenfeldlänge erfaßt wurde.

### 3.3.4 Messung der Temperatur der Schubzulagen

Die Temperatur der Schubleitern wurde durch Fe-Konst.-Thermoelemente verfolgt, die in halber Balkenhöhe an den Vertikalstäben sowie im unteren Balkenbereich an den Längs-Verankerungsstäben angebracht waren. Soweit möglich, wurden die Meßstellen in den gleichen Balkenquerschnitten wie die Bügelmeßstellen angeordnet. Wegen unterschiedlicher Abstände der Vertikalschenkel war das nicht immer exakt möglich.

### 3.3.5 Messung der vertikalen Verformung

Mit Hilfe feiner Stahldrähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Rollenmeßgeräten geführt waren, wurde die vertikale Durchbiegung in Feldmitte der Balken gemessen. Sofern wegen der Belastungseinrichtung die Meßstelle nicht genau in Feldmitte angebracht werden konnte, erfolgte die Messung an einem definierten Punkt möglichst nahe der Feldmitte.

### 3.4 Sonstige Beobachtungen

Das Verhalten der Balken wurde während der Versuche dauernd kontrolliert; insbesondere wurden Feuchtigkeitsaustritt, Rißbildungen und Abplatzungen beobachtet.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Brandraumtemperatur

Trotz der ungünstigen Brandraumbedingungen, die sich durch die Einbauten von Auflagerwänden ergaben, deren Massen mit erwärmt werden mußten, gelang es immer, im Laufe des Versuchs eine befriedigend gleichmäßige Temperatur längs der Balkenachse zu erreichen, d.h. nach Durchlaufen einer mehr oder weniger uneinheitlichen Anfangsphase lagen die Temperaturmeßwerte auch der gestörten Bereiche innerhalb der Toleranz der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2.

Auf eine Darstellung des Brandraumtemperaturverlaufs wird verzichtet.



#### 4.2 Temperatur der Biegezugbewehrung

Der Temperaturverlauf an der untenliegenden Biegezugbewehrung in Feldmitte wurde verfolgt, um Referenzwerte bei Biegebrüchen zu erhalten. Da jedoch keine Biegebrüche auftraten, wird auf die Darstellung des Temperaturverlaufs verzichtet.

#### 4.3 Bügeltemperatur

Der Verlauf der Temperatur an den Bügeln ist auf den Anlagen 3.1-3.8 dargestellt. Wegen der Vielzahl der Meßpunkte ist jeweils der Mittelwert und der Streubereich jeder Gruppe von Meßpunkten - senkrechte Bügelschenkel, waagerechte Bügelschenkel - gezeigt. Die beim Versagen der Prüfkörper erreichte Bügeltemperatur (Mittelwert) ist angegeben.

Auf eine gesonderte Darstellung der Temperaturentwicklung an den auflagnahen Bügeln wurde verzichtet, da sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den übrigen ergab (vergl. 4.1).

#### 4.4 Temperatur der Schubzulagen

Der Verlauf der Temperatur an den Schubleitern ist auf den Anlagen 4.2-4.7 dargestellt. Auch hier ist jeweils der Streubereich einer Gruppe von Meßpunkten und der zugehörige Mittelwert bezeichnet. Zahlenmäßig bezeichnet wurde die beim Versagen der Prüfkörper erreichte Temperatur dieser Mittelwerte.

Auf eine gesonderte Darstellung der Temperaturentwicklung an den auflagnahen Schubleitern wurde verzichtet, da sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den übrigen ergab (vergl. 4.1).

#### 4.5 Vertikalverformung

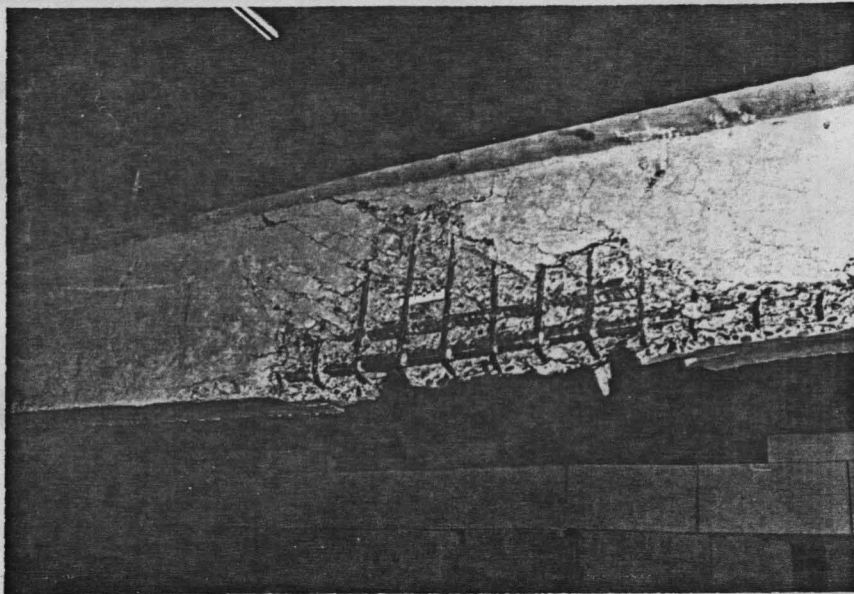
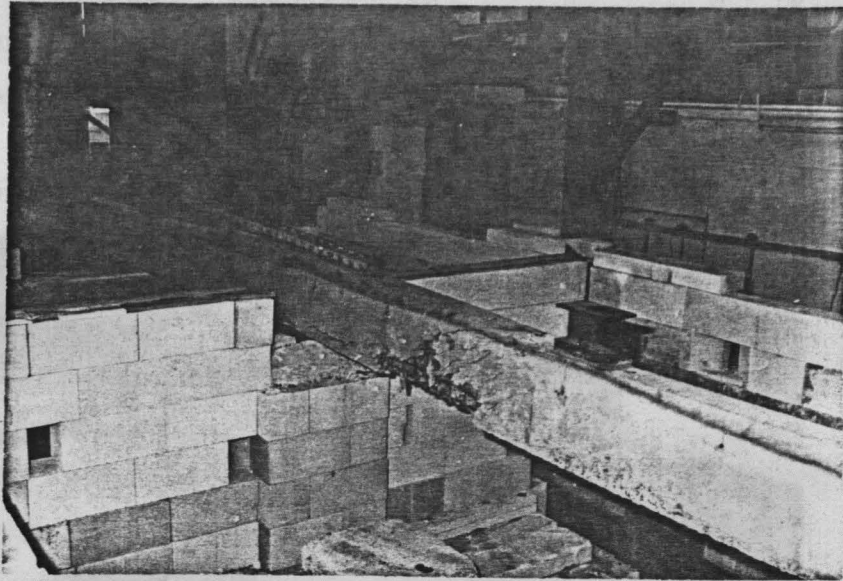
Die Vertikalverformung der Versuchskörper in Feldmitte bzw. bei den Einfeldbalken unter den Lasten ist auf den Anlagen 5.1-5.8 dargestellt

#### 4.6 Sonstige Beobachtungen

##### 4.6.1 Versuchskörper 1 (Bilder 1 und 2)

17. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelstützenbereich; Abstand durch Bügelabstand vorgegeben;
25. " Schrägrisse markiert durch Wasseraustritt aus den Balkenseitenflächen, desgl. senkrechter Riß im oberen Balkenbereich nahe dem Lasteintragungspunkt in Feld 1;
60. " Weite der Biegezugrisse auf der Balkenoberseite  $\lesssim 1,5$  mm;
62. " in Mittelauflagnähe des Feldes 1 Bildung von waagerechten und schrägen Rissen im unteren Balkenbereich;
64. " desgl. in Feld 2;
- 80./81. " gleichmäßige Weite  $\lesssim 1$  mm der langsam hochwandernden Schrägrisse in beiden Feldern;
82. " Rißweite auf der Balkenoberseite  $\sim 2$  mm;
86. " Weite der Schrägrisse Feld 2  $\sim 2$  mm
90. " " " " 1  $\sim$  3 mm
93. " " " " 2  $\sim$  4 mm
94. " " " " 1  $\sim$  5 mm
95. " rapide Rißerweiterung in Feld 2, Abfallen der äußeren Betonschale, Versuchsende, Versagen in Feld 2.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone mit starker Deformation, jedoch ohne Bruch der Bügel, deren Vertikalschenkel i.M. auf  $660^{\circ}\text{C}$  und untere waagerechte Schenkel auf i.M.  $750^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden.



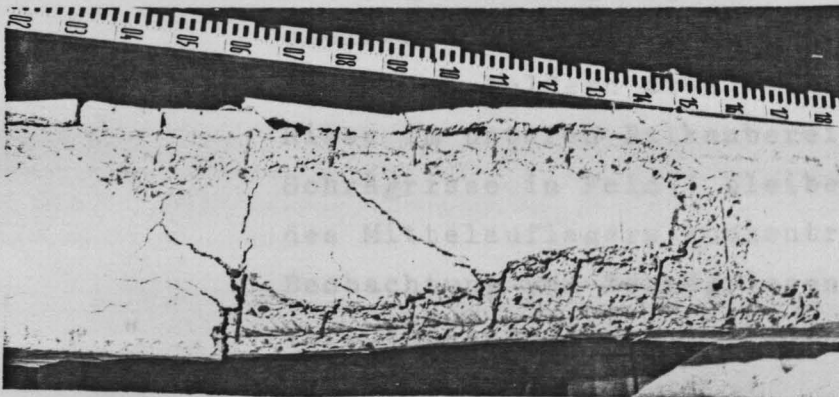
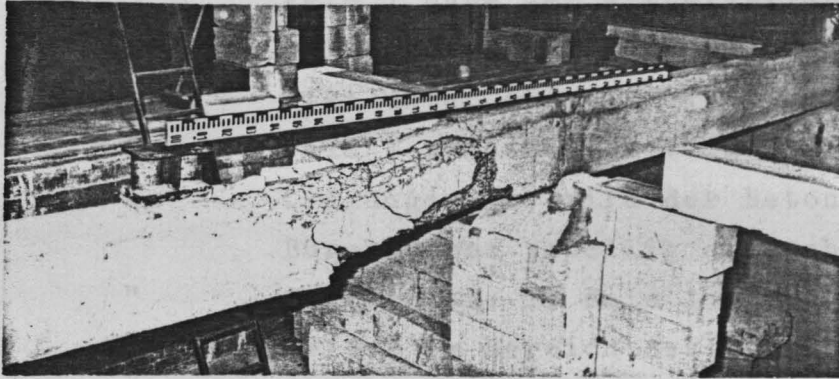
Bilder 1 und 2: Balken 1 nach dem Wiedererkalten. Trotz sehr gleichmäßiger Rißentwicklung in beiden Feldern während des Versuchsverlaufs trat der Bruch nur in Feld 2 ein, die Risse in Feld 1 haben sich weitgehend wieder zusammengezogen.

#### 4.6.2 Versuchskörper 2 (Bilder 3-5)

26. Versuchsminute: Versuchsende, Bruch in Feld 2.

Vom Mittelauflager aus gemessen war ein etwa 65 cm langer Balkenabschnitt relativ gut erhalten, jedoch von deutlichen Schrägrissen durchsetzt; die Ausbildung der Biegezugrisse auf der Oberseite war schwach. Der anschließende, etwa 1,50 m lange Balkenbereich bis zum Lasteintragungspunkt war total dadurch zerstört, daß sich in den Ebenen der Schubleitern vertikale Bruchebenen gebildet hatten, die den Balken in drei nebeneinander-

liegende "Scheiben" teilten. Die Umschließungsbügel, deren Vertikalschenkel i.M. auf  $280^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden, waren im Bruchbereich aufgebogen, und der Balken war bis auf etwa 25 cm aufgeweitet. Dabei hatte er sich etwa 6 cm aus der Längsachse verschoben.



Bilder 3 und 4: Balken 2 nach dem Wiedererkalten.

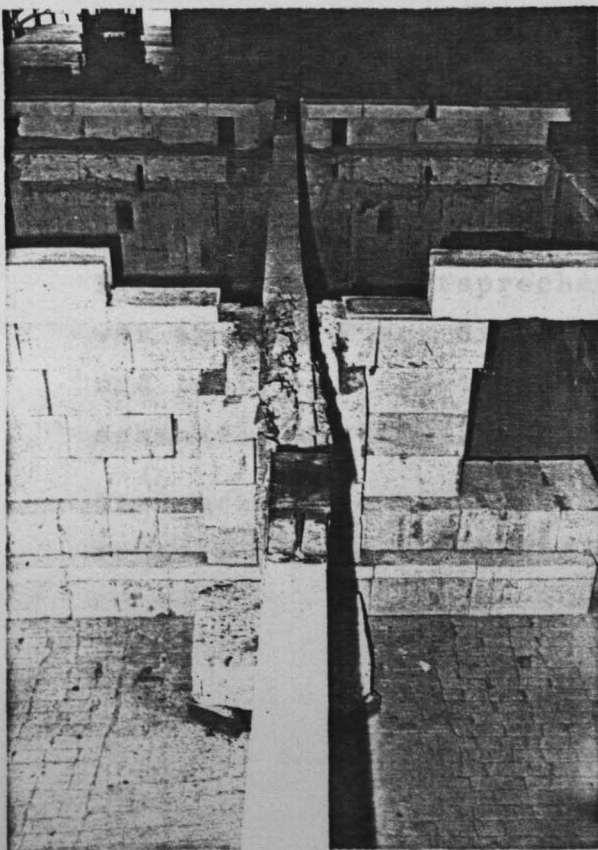


Bild 5:

Draufsicht auf den zerstörten Prüfkörper 2; die Spaltung in drei "Balkenscheiben" ist zu erkennen.

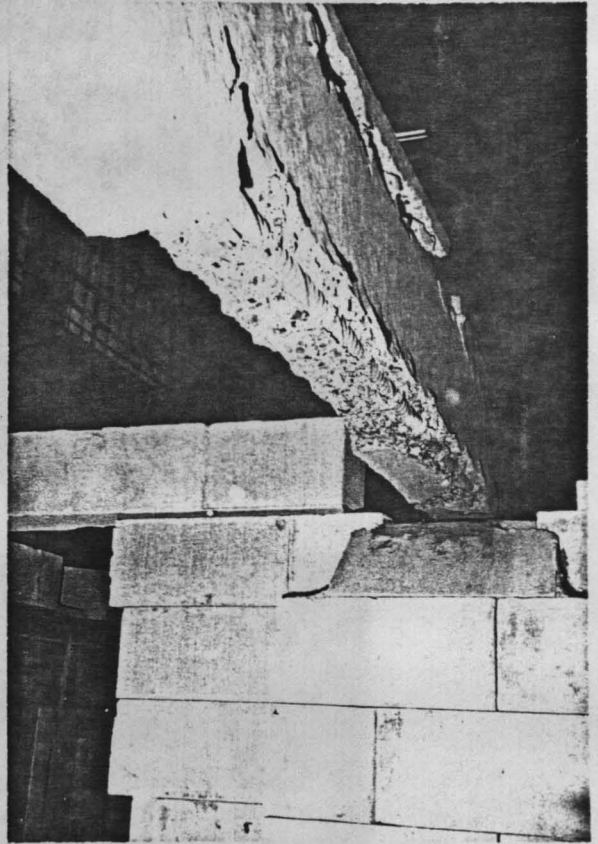
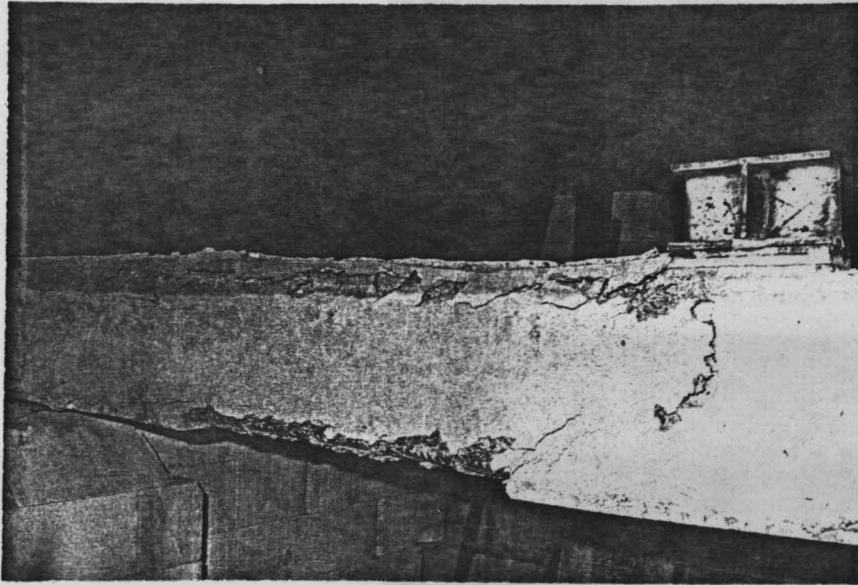
#### 4.6.3 Versuchskörper 3 (Bilder 6 und 7)

40. Versuchsminute: bisher nur geringe und undeutliche Ausbildung von Biegezugrissen auf der Balkenoberseite im Bereich des Mittelaufagers.
46.               "       Feld 1 nahe dem Mittelauflager im oberen Balkenbereich Beginn von Schrägrissen, etwa unter  $45^{\circ}$ .
50.               "       Feld 1 zwischen Mittelauflager und Lasteintragungspunkt wird der Beton oberhalb des Bügelkorbes schollig abgeschoben.
54.               "       Schrägrisse in Feld 1 weiten sich.
59.               "       Feld 2 im Bereich des Mittelaufagers Markierung von Biegezugrissen auf der Balkenoberseite.
60.               "       in beiden Feldern etwa waagerecht laufende Risse im unteren Balkenbereich.
65.               "       Schrägrisse in Feld 1 bleiben in der Nähe des Mittelaufagers konzentriert; keine Beobachtung von Schrägrissen in Feld 2.
72.               "       Versuchsende; Bruch im Feldbereich Feld 1.

Der Bruch ging vom Lasteintragungspunkt in Feld 1 aus, wo sich klaffende Schrägrisse bildeten. Der in Richtung Mittelauflager anschließende Bereich von etwa 1,60 m Länge zeigte starke Zerstörungen im oberen Balkenteil; die gesamte untere Betondeckung und die unteren Balkenecken fielen ab; in diesem Bereich zeigten sich nur schwache Schrägrisse. Klaffende Schrägrisse traten im engeren, nur etwa 0,40 m langen Mittelauflagerbereich des Feldes 1 auf. Relativ geringe obere Biegezugrisse in diesem Bereich und im entsprechenden Abschnitt des Feldes 2. Im übrigen war im Feld 2 nur die obere Betonzone zwischen Mittelauflager und Lastpunkt schollenartig abgeschoben. Die Bügel (Vertikalschenkel) wurden i.M. auf  $575^{\circ}\text{C}$  erwärmt.

Im Bruchbereich Feld 1 zeigte sich ein durchgehender senkrechter Riß in der Ebene der Schubleiter.





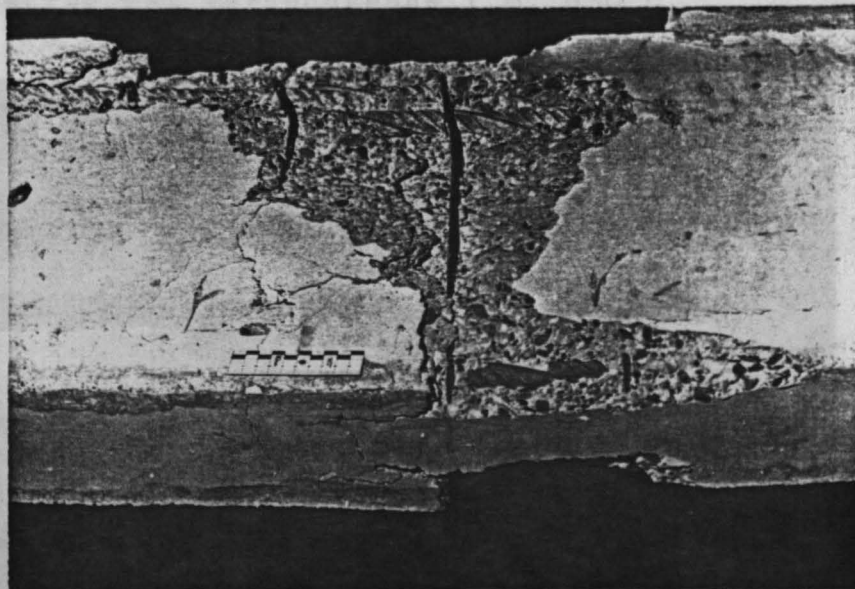
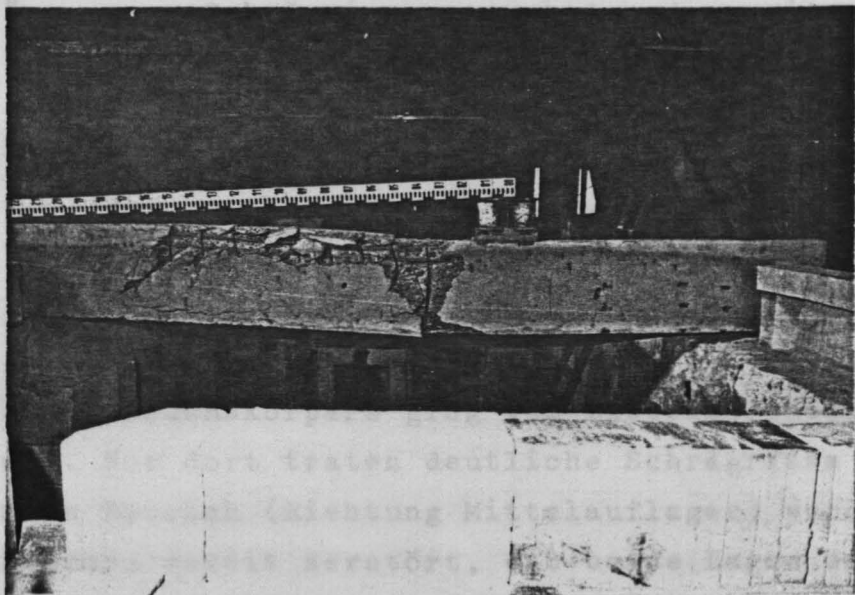
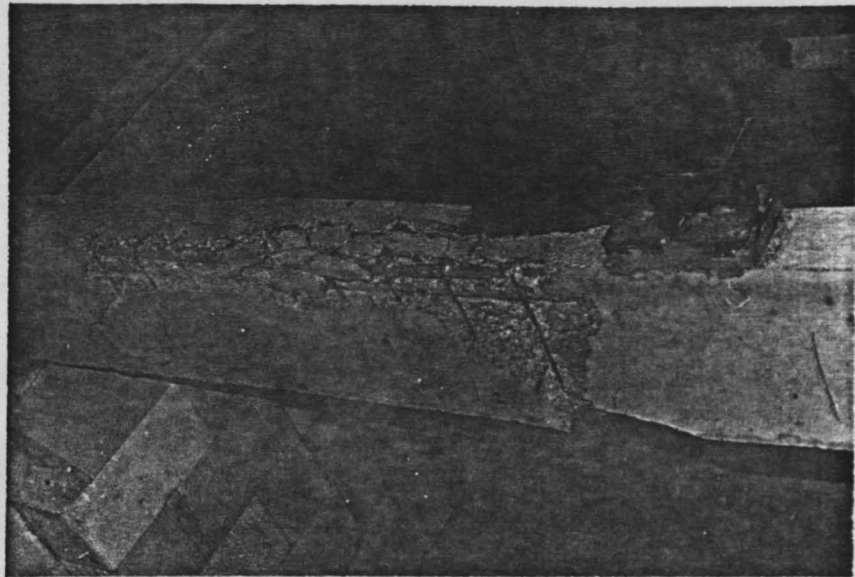
Bilder 6 und 7: Balken 3 nach dem Wiedererkalten

#### 4.6.4 Versuchskörper 4 (Bilder 8-10)

33. Versuchsminute: Versuchsende; Bruch in Feld 2.

Der Bruch, ausgehend vom Lasteintragungspunkt in Feld 2, trat ohne Vorankündigung ein. Während der Versuchsbeobachtung fiel auf, daß sich keine Biegezugrisse im Mittelaullagerbereich bildeten.

Schrägrisse konzentrierten sich im Lasteinleitungs- und Mittelaullagerbereich. Dazwischen wurde im wesentlichen die obere Betonzone schollig abgeschoben und eine Auftrennung des Balkens in zwei nebeneinander liegende Scheiben eingeleitet durch einen klaffenden Riß in Ebene der Schubleiter. Die Umschließungsbügel zeigten starke Verformungen, jedoch keine Brüche; ihre Vertikalschenkel wurden auf i.M.  $345^{\circ}\text{C}$  erwärmt.



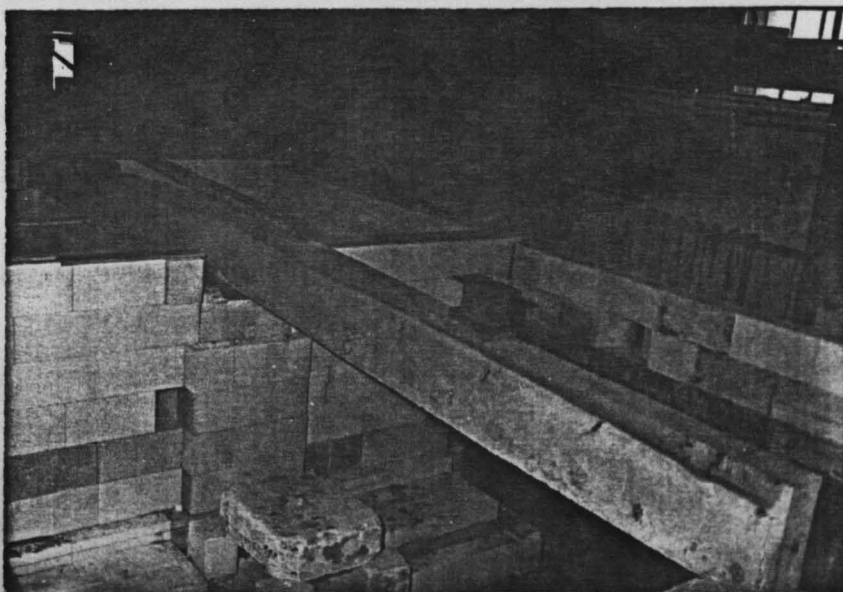
Bilder 8 - 10: Balken 4 nach dem Wiedererkalten



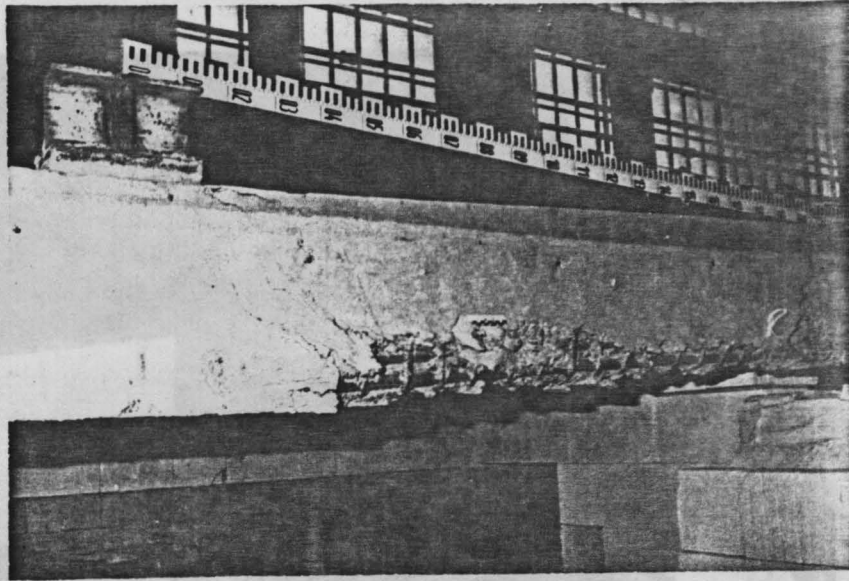
#### 4.6.5 Versuchskörper 5 (Bilder 11 und 12)

7. Versuchsminute: leichte örtliche Abplatzungen
37. " schwach markierte Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelauflegerbereich, Abstand durch Bügelabstand vorgegeben.
75. " Weite der beschriebenen Risse  $\lesssim 1$  mm
76. " waagerechte Risse im unteren Stegbereich in beiden Feldern
81. " Schrägrisse im Lasteintragungsbereich Feld 1
82. " ähnliche Ausbildung in Feld 2
88. " Schrägrisse vermehrt und erweitert, im Lastbereich deutlicher als im Auflagerbereich.
92. " Weite der Biegezugrisse auf der Balkenoberseite  $\lesssim 2$  mm.
93. " Schrägrisse Feld 1  $\sim 2$  mm weit
95. " Schrägrisse Feld 1 erweitern sich schnell
96. " Versuchsende, Bruch in Feld 1.

Der Bruch des Versuchskörpers ging vom Lasteintragungspunkt im Feld 1 aus. Nur dort traten deutliche Schrägrisse auf. Im anschließenden Bereich (Richtung Mittelaufleger) wurde die untere Balkenzone soweit zerstört, daß beide Lagen der Längsbewehrung sichtbar waren. Temperatur der vertikalen Bügel-schenkel betrug bei Versuchsende i.M.  $630^{\circ}\text{C}$ .





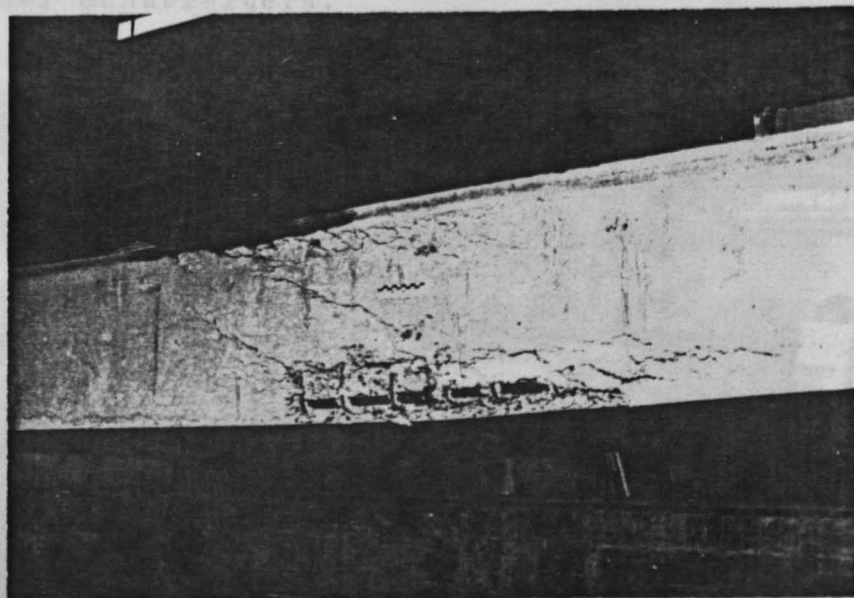
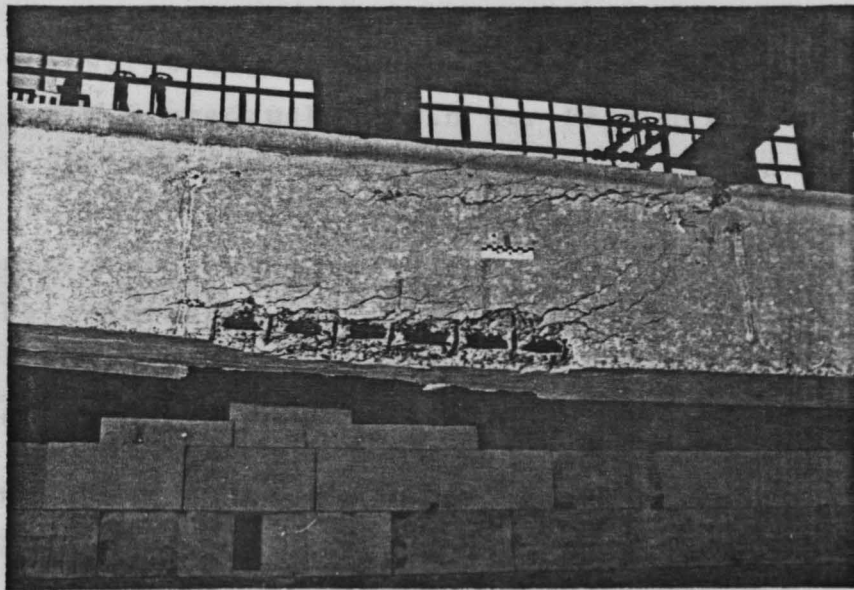
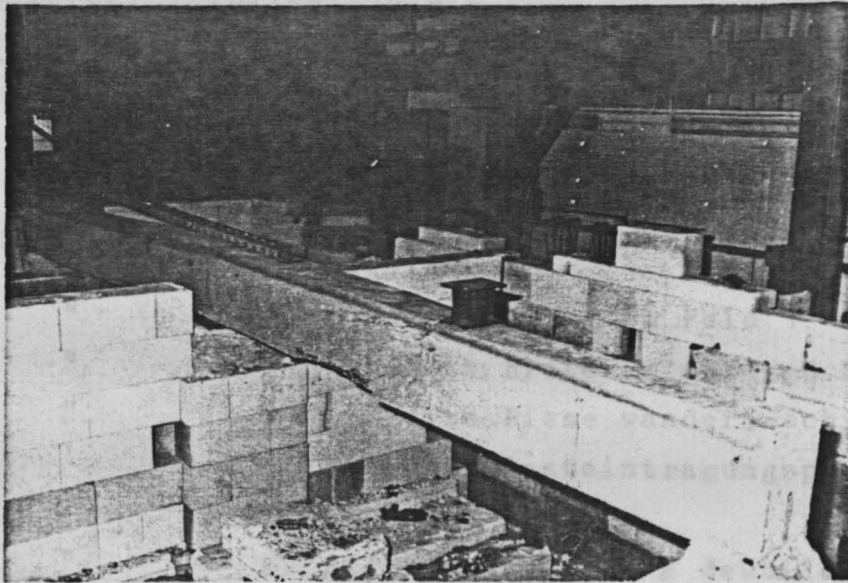


Bilder 11 und 12: Balken 5 nach dem Wiedererkalten

#### 4.6.6 Versuchskörper 6 (Bilder 13-15)

- |     |                 |  |  |
|-----|-----------------|--|--|
| 15. | Versuchsminute: | durch Wasseraustritt aus den Balkenseiten- | flächen markieren sich Schrägrisse.          |
| 25. | "               | Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im   | Mittelstützenbereich, Abstand durch Bügel-   |
|     |                 | abstand vorgegeben.                        |  |
| 50. | "               | waagerechte Risse im unteren Stegbereich   | in der Nähe des Mittelauftragers.            |
| 73. | "               | Feld 2 Schrägrißbildung zwischen Lastein-  | leitungspunkt und Mittelauftrager, beginnend |
|     |                 | im unteren Balkenbereich.                  |  |
| 74. | "               | Feld 1 entsprechende Beobachtung           |  |
| 82. | "               | Feld 2 Schrägrißweite $\sim 3$ mm          |  |
| 83. | "               | Feld 1                                     | " $\sim 2$ mm                                |
| 85. | "               | Feld 2                                     | " $\sim 4$ mm                                |
| 87. | "               | Versuchsende nach rapider Rißerweiterung   | in Feld 2; Abfall der Vertikallast.          |

Der Versuch wurde beendet, als der Kolbendruck der lasteintragenden Pressen nicht mehr gehalten werden konnte. Wie aus dem Diagramm der Vertikaldurchbiegung (Anlage 5.6) hervorgeht, ist dadurch nicht ganz das Bruchstadium der vorangegangenen Versuchskörper erreicht worden. Die mittlere Temperatur der vertikalen Bügelschenkel betrug bei Versuchsende  $625^{\circ}\text{C}$ . Die Schrägrisse waren im Lasteintragungsbereich besonders deutlich, in Nähe des Mittelauftragers weniger ausgeprägt.



Bilder 13-15: Balken 6 nach dem Wiedererkalten

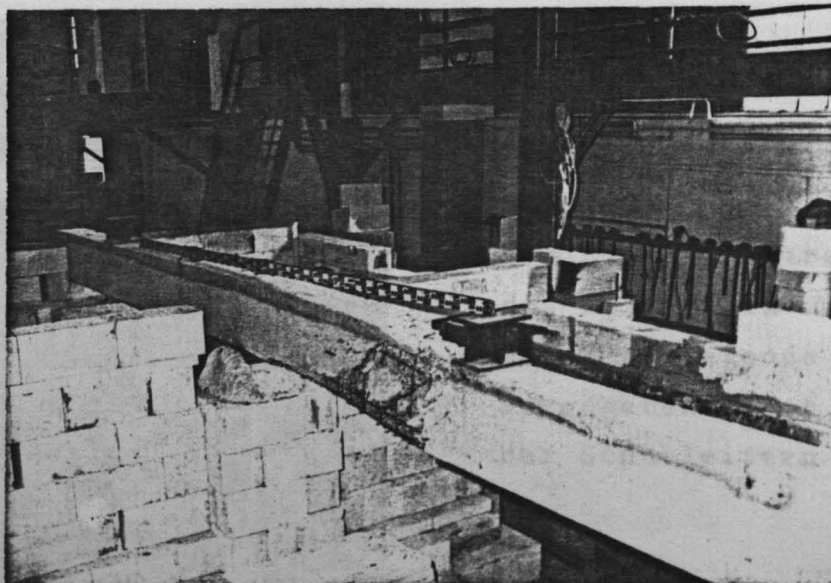


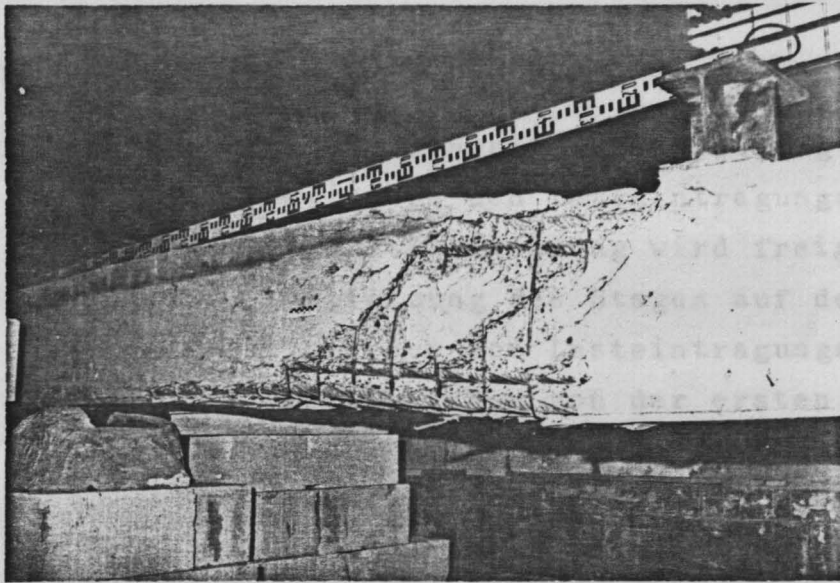
#### 4.6.7 Versuchskörper 7 (Bilder 16 bis 20)

17. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelstützenbereich, Abstand durch Bügelabstand markiert; durch Wasseraustritt aus den Balkenseitenflächen markieren sich Schrägrisse.
32.       "       kleine Abplatzung im Feld 1
45.       "       waagerechte Risse im unteren Stegbereich
60.       "       waagerechte Risse wandern schräg nach oben in Richtung Lasteintragungspunkt, besonders in Feld 2
72.       "       Schrägrisse in Feld 2 deutlich geweitet
73.       "       Versuchsende, Bruch in Feld 2.

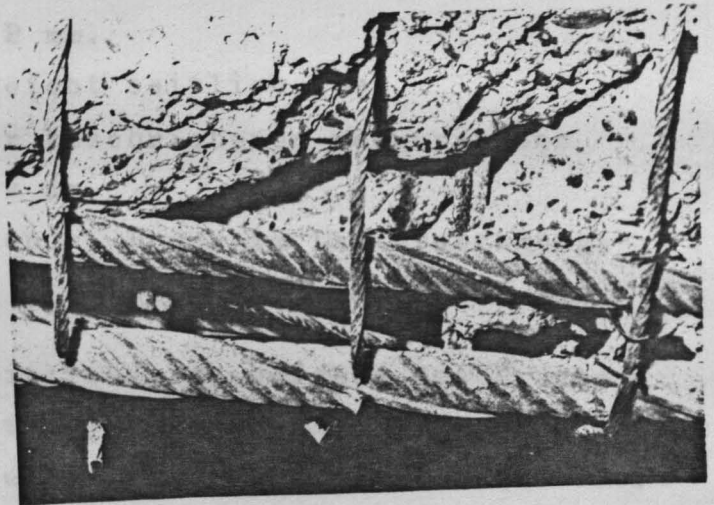
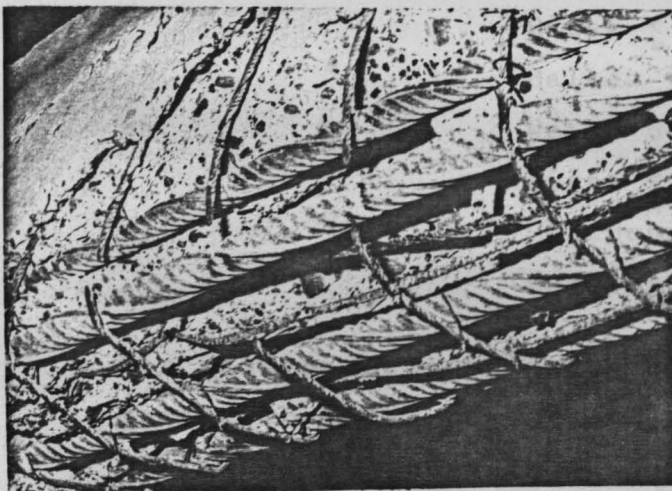
Beim Bruch wurde die Betondeckung der Bügel weitgehend abgesprengt, die Biegedruckzone in der Nähe des Lastpunktes wurde zerstört. Einige der Umschließungsbügel rissen im Bereich der unteren Ecke. Der Balken war im Bruchbereich auch vertikal in den Ebenen der Schubleitern geborsten. Die Bügeltemperatur betrug beim Versagen i.M.  $565^{\circ}\text{C}$  an den Vertikalschenkeln und  $> 600^{\circ}\text{C}$  an den unteren waagerechten Schenkeln (Messung an der Biegezugbewehrung in Feldmitte).

Nach dem Ausbau wurde der Balken im weniger zerstörten Feld 1 im zum Bruch korrespondierenden Bereich aufgeschnitten. Es zeigten sich auch dort bereits durchgehende Risse in den Ebenen der Schubleitern.





Bilder 16 und 17: Balken 7 nach dem Wiedererkalten



Bilder 18 und 19: Nach dem Entfernen der äußeren losen Schichten sind die Bügelbrüche und das zerborstene Balkengefüge deutlich sichtbar.

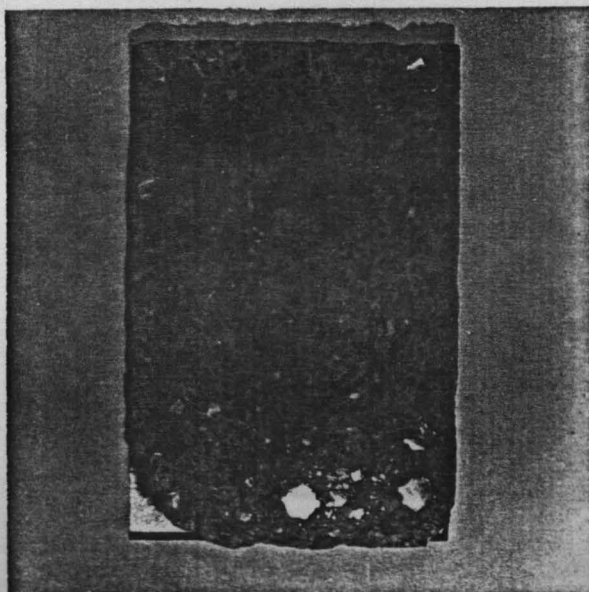


Bild 20:

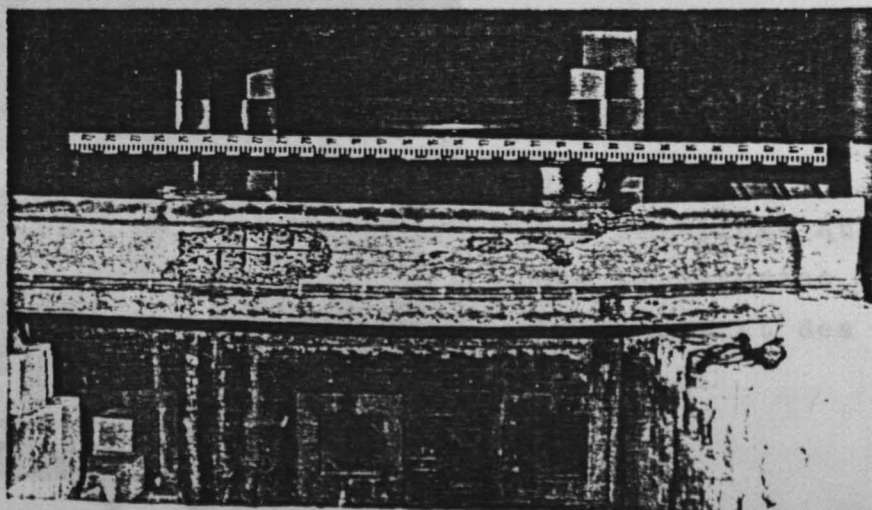
Beginn der Auftrennung des Balkens in drei nebeneinanderliegende "Scheiben", vorgegeben durch die Ebenen der Schubleitern

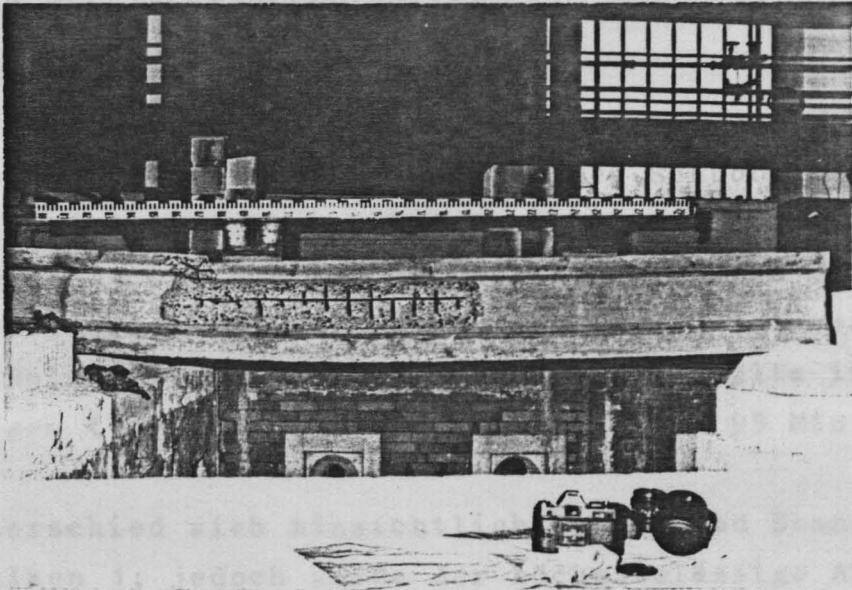


#### 4.6.8 Versuchskörper 8 (Bilder 21 bis 24)

23. Versuchsminute: große einseitige Abplatzung des Steges zwischen den Lasteintragungspunkten; die Stegbewehrung wird freigelegt.
28. " Abplatzung des Steges auf der Gegenseite zwischen den Lasteintragungspunkten im Bereich, der von der ersten Abplatzung nicht erfaßt war; die Stegbewehrung wird freigelegt.
48. " waagerechte Risse im Steg auf der unversehrten Seite im Bereich der erstgenannten Abplatzung.
51. " Weite der beschriebenen waagerechten Risse  $\lesssim 2$  mm.
53. " Balken weicht seitlich aus.
56. " Weite der beschriebenen waagerechten Risse  $\lesssim 4$  mm.
57. " Versuchsende, Bruch im Lasteintragungsbereich.

Der Balken versagte durch seitliches Ausweichen des Druckgurtes über der großen Abplatzung, die den Steg auf etwa die Hälfte seines Querschnitts (einseitig) geschwächt hatte. Der Bruch des Obergurtes befand sich unmittelbar neben dem Lasteintragungspunkt in Richtung Auflager. Auch beim gegenüberliegenden Lastpunkt begann die Schiefstellung - Ausweichen des Obergurtes - des Querschnitts.





Bilder 21 und 22: Balken 8 nach dem Wiedererkalten

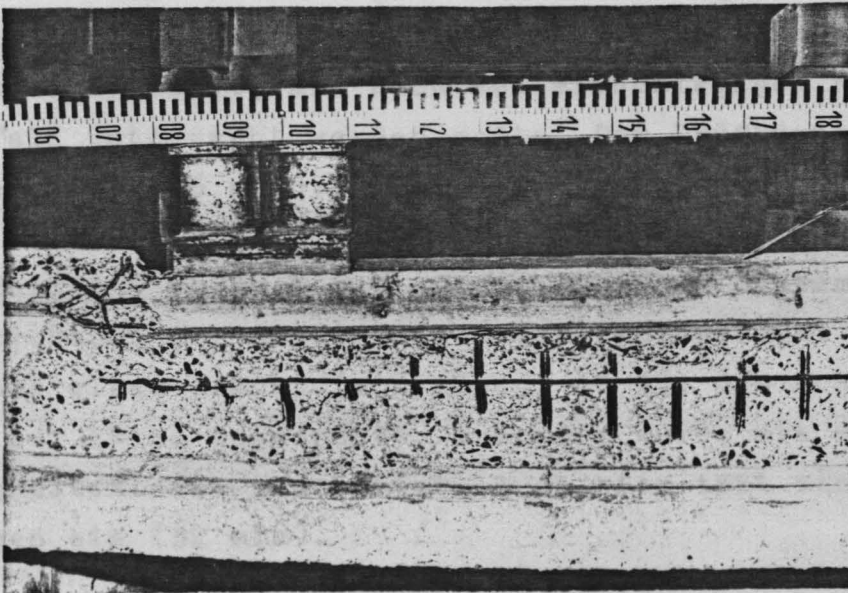


Bild 23:

Große einseitige Steg-  
abplatzung und Bruch  
des Druckgurtes

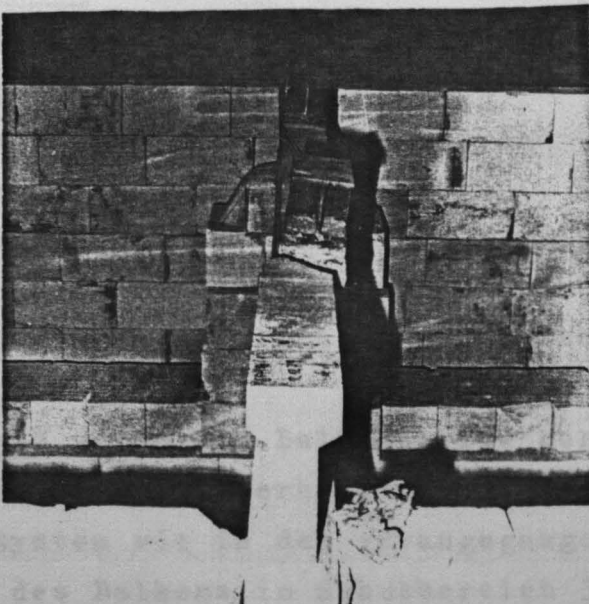


Bild 24:

Das seitliche Ausweichen  
des Druckgurtes wird in der  
Längsansicht des Balkens  
deutlich.

## 5. Diskussion der Versuchsergebnisse

### 5.1 Durchlaufsysteme

Balken 1 wurde als Vergleichskörper hergestellt und geprüft. Er wurde nach DIN 1045 konstruiert und für den Schubbereich 3 (obere Grenze) ausschließlich mit Umschließungsbügeln bewehrt. Seine Ausbildung genügte im übrigen den Mindestanforderungen der DIN 4102 für die Feuerwiderstandsklasse F 90, wobei hier das wesentliche Merkmal die Balkenbreite ( $b = 150 \text{ mm}$ ) war. Er erfüllte im Versuch die Erwartungen (Versagen durch Schubbruch nach 95 Minuten).

Balken 2 unterschied sich hinsichtlich System und Beanspruchung nicht von Balken 1; jedoch wurde der höchstzulässige Anteil (80 %) der Schubbewehrung durch Schubzulagen (Leitern) gebildet, die in zwei Ebenen angeordnet waren (vergl. Anlage 1.2). Bei einer Balkenbreite von nur 150 mm ergab sich dabei wegen extrem enger Bewehrungslage eine praxisferne Konstruktion, die aber, wie unter 2.1.1 bereits ausgeführt, als nach den einschlägigen Normen zulässiger Grenzfall untersucht werden mußte. Der Prüfkörper versagte weit vor der Zeit (26 min).

Beim Balken 4 wurde bei wiederum gleichem System und entsprechender Beanspruchung der Anteil der Umschließungsbügel an der Schubspannungsaufnahme etwas erhöht (von 20 auf 40 %); die Schubleitern wurden in nur einer Ebene angeordnet. Außerdem wurde mit einer geringen Betonfestigkeitsklasse gearbeitet. Auch hier trat ein weitaus verfrühtes Versagen ein (32 min).

Balken 3 und 5 erhielten bei wiederum gleichem System einen nochmals erhöhten Anteil (60 %) an Umschließungsbügeln. Balken 3 befand sich im Schubbereich 2 mit einem Schubdeckungsgrad von 0,67, während Balken 5 an der oberen Grenze des Schubbereichs 3 lag. Die Schubleitern waren in einer Ebene verlegt. Es ergaben sich deutlich bessere Versuchsdaten (Balken 3: 72 min, Balken 5: 96 min). Allerdings muß erwähnt werden, daß bei Balken 5 die angestrebte Betonfestigkeitsklasse deutlich überschritten wurde.

Bei Balken 6 wurde die Balkenbreite gegenüber dem in DIN 4102 geforderten Mindestwert erheblich - auf 250 mm - vergrößert. Bei gleichem System wie in den vorangegangenen Versuchen lag die Beanspruchung des Balkens im Schubbereich 3 (obere Grenze), der Anteil der Schubzulagen, die in zwei Ebenen (vergl. Anlage 1.6) angeordnet

waren, betrug 70 %. Die angestrebte Feuerwiderstandsdauer wurde annähernd erreicht (87 min), wobei allerdings wieder zu beachten ist, daß die Betondruckfestigkeit zu hoch ausgefallen war.

Balken 7 unterschied sich gegenüber Balken 6 durch eine niedrige Betonfestigkeitsklasse und durch einen geringfügig höheren, konstruktiv bedingten Schubzulagenanteil (75 %). Dieser Balken versagte nach 73 Minuten.

#### 5.1.1 Diskussion der Schubbruch-Phänomene

Durch die Versuchsreihe wurde deutlich, daß das Brandverhalten von Balken mit Schubzulagen positiv beeinflusst wird durch

- Erhöhung des Anteils der Umschließungsbügel,
- Vergrößerung der Balkenbreite.

Mehr oder weniger deutlich ausgeprägt zeigte sich bei fast allen mit Schubleitern versehenen Prüfkörpern die Tendenz zu Brüchen, die die Balken in Ebene der Schubleitern aufspalteten in zwei bzw. drei nebeneinander liegende Balken-"Scheiben". Nach Angabe von Herrn Dr.-Ing. Eligehausen, Stuttgart, sind solche Brüche bei den Versuchen unter Normaltemperatur, die zur Einführung der Schubzulagen in DIN 1045 (1978) herangezogen wurden, niemals beobachtet worden.

Jedoch wird über entsprechende Erscheinungen bei Brandversuchen an vorgespannten Balken, die überhaupt keine Umschließungsbügel aufwiesen, von der Portland Cement Association, USA, berichtet [6]. Dort wurde der Grund des Aufspaltens zunächst in der "Erzeugung übermäßigen Dampfdrucks durch Feuchtigkeitsanhäufung entlang der Bewehrungsstäbe, obwohl keiner der Balken ungebührlich hohen Feuchtegehalt aufwies", gesucht. Das Aufspalten häufte sich jedoch nicht bei Versuchskörpern mit höherem Feuchtegehalt, und man wies den Effekt wenigstens teilweise der unterschiedlichen thermischen Dehnung von Beton und Stahl zu, durch die tangential Beton - Zugspannungen in der unmittelbaren Umgebung der Stahlstäbe erzeugt werden.

Beide Faktoren können - wenn überhaupt - nur geringfügig zur Ausbildung der beobachteten Bruchebenen beitragen; die wesentlichen Ursachen sind im Verlauf der inneren Kräfte eines schubbeanspruchten Balkens zu suchen:

Die Darstellung der inneren Kräfte im Querkraftbereich eines biegebeanspruchten "kalten" Balkens (Bild 25) ist [7] entnommen.



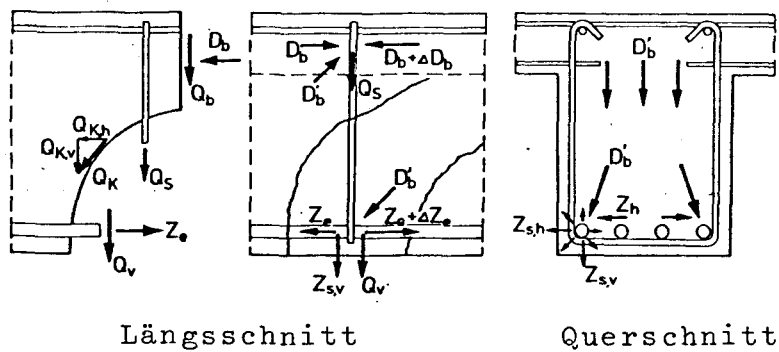


Bild 25: Innere Kräfte im Querkraftbereich eines biegebeanspruchten Balkens

Die schiefen Druckstreben  $D'_b$  des gedachten Schubfachwerks stützen sich bevorzugt in den Bügelecken ab, wodurch in Balkenquerrichtung wirkende Zugkräfte  $Z_h$  geweckt werden, die von den horizontalen Schenkeln der Umschließungsbügel aufzunehmen sind. Das gleiche gilt für die Horizontalkomponenten  $Z_{s,h}$  der durch Zugkraftänderung und Verbund geweckten Sprengkräfte in der Umgebung der Längsstäbe. Wenn Schubzulagen angeordnet werden, entstehen im Bereich ihrer längslaufenden Verankerungsstäbe ebenfalls quergerichtete Spaltzugkräfte  $Z_{s,h}$ , für deren Aufnahme kein Stahl zur Verfügung steht, die also dem Beton zugewiesen werden müssen. Die Untersuchungen [7,8] haben erwiesen, daß unter Normaltemperatur auf diese Weise ausreichende Schubsicherheit gewährleistet ist bei Anordnung eines Minimalanteils von Umschließungsbügeln.

Unter Brandbeanspruchung werden die in der oben dargestellten Art durch  $Z_h$  und  $Z_{s,h}$  zugbeanspruchten unteren Bügelschenkel frühzeitig stark erwärmt und dadurch in ihrer Tragfähigkeit deutlich geschwächt. (Oberhalb etwa  $500^\circ\text{C}$  sinkt die Fließgrenze unter die zulässige Gebrauchsspannung.) Bei Balken mit konventioneller, nur aus Umschließungsbügeln bestehender Schubbewehrung ist daraus kein vorzeitiges Versagen zu erwarten. Bei Anordnung von Schubzulagen werden Anzahl und ggf. Querschnitt der unteren Bügelschenkel jedoch erheblich reduziert, ohne daß ein statischer Nachweis erforderlich ist.

Auch die unteren Verankerungsstäbe der Schubzulagen liegen im Bereich relativ schneller Erwärmung, durch die die Betonzugfestigkeit reduziert wird, welche zur Aufnahme der Spaltzugkräfte herangezogen wurde.

Bei instationärer Temperaturbeanspruchung von Betonbauteilen - bei Balken i.a. von den Seiten und von unten - werden im Querschnitt Temperaturfelder aufgebaut, die Eigenspannungen erzeugen: in den Randbereichen Druck, im Querschnittsinnern Zug. Die Zug-Eigenspannungen überschreiten häufig die Betonzugfestigkeit, und es entstehen Risse, bei homogenem, also nicht von Bewehrung durchsetztem Querschnittsinnern i.a. ein engmaschiges Rißnetz ohne bevorzugte Richtung, das keinen signifikanten Einfluß auf das Brandverhalten hat.

Anders bei Balken mit Schubzulagen im Querschnittsinnern: Wegen der unterschiedlichen Temperaturleitfähigkeit von Stahl und Beton bedeuten Bewehrungsstäbe eine Störung im Temperaturfeld des Betonquerschnitts, wie es schematisch in Bild 26 gezeigt wird.

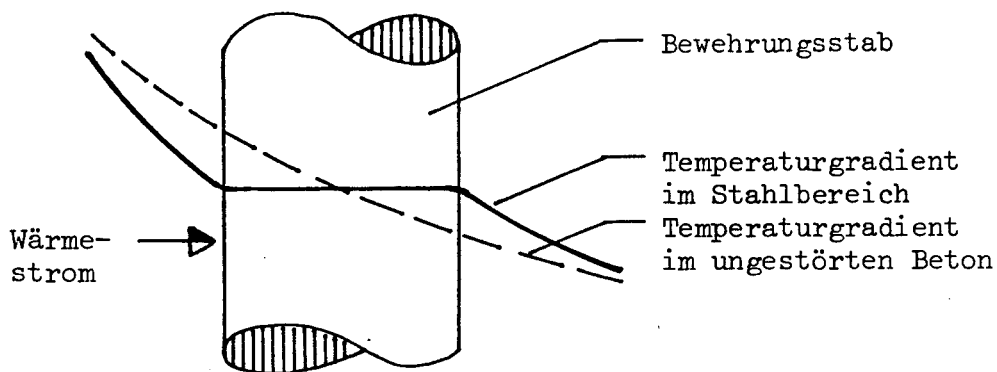


Bild 26: Schematischer Temperaturverlauf im Stahlbetonquerschnitt bei instationärer Wärmebeanspruchung

Durch die Unstetigkeit des Temperaturgradienten an der Berührungsfläche Beton/Stahl entsteht - auch bei Annahme gleicher Temperaturausdehnungskoeffizienten - ein Eigenspannungszustand, der auf der jeweils wärmeren Seite des Stahls radiale und tangentiale Beton-Zugspannungen erzeugt, die zu Rißbildung führen können [9].

Zusammenfassend können die folgenden Faktoren, die das Brandverhalten im Schubbereich von Balken mit leiterartigen Schubzulagen ungünstig beeinflussen, genannt werden:

- Querkzugspannungen im unteren Balkenbereich bereits unter Normaltemperatur,
- Betonzugspannungen im Querschnittsinnern durch instationäres Temperaturfeld,
- Betonzugspannungen in der Umgebung von Stahleinlagen durch Unstetigkeit im instationären Temperaturfeld,
- Betonzugspannungen in der Umgebung von Stahleinlagen durch unterschiedliche Temperaturdehnungskoeffizienten,
- Verminderung der Betonzugfestigkeit durch Erwärmung,
- Verminderung der Bügeltragfähigkeit durch Erwärmung,
- reduzierter Bügelquerschnitt wegen Schubzulagen.

Die Summe dieser Einflüsse kann ein verfrühtes Versagen solcher Konstruktionen in der beobachteten Art hervorrufen. Die günstige Wirkung eines höheren Umschließungsbügelanteils und eines breiteren Balkenquerschnitts auf das Brandverhalten ist damit evident.

Die durchgeführte Versuchsreihe an Balken, bei denen ein Teil der erforderlichen Schubbewehrung durch leiterförmige Schubzulagen gebildet wurde, hat erwiesen, daß bei Ausnutzung der durch DIN 1045 und DIN 4102 gegebenen Möglichkeiten keine ausreichende Schubsicherheit im Brandfall (Normbrand) gegeben ist.

## 5.2 Einfeldbalken

Balken 8 wurde als I-Querschnitt konstruiert mit der nach DIN 4102 für die geringste Feuerwiderstandsklasse (F 30) mindestens erforderlichen Stegbreite von 80 mm, die gleichzeitig nach DIN 1045 die höchstzulässige Stegbreite von Fertigteilträgern ist, wenn im Stegbereich einschnittige Schubzulagen allein verwendet werden sollen.

Das Verhalten des Prüfkörpers während des Brandversuchs wurde durch die Anordnung der Steg-Schubbewehrung in nur einer Ebene (Symmetrieachse des Querschnitts) insofern beeinflusst, als großflächige Betonabplatzungen auftraten, die jeweils eine Steghälfte absprengten. Die Seitenstabilität des Systems wurde dadurch empfindlich gestört, und der Bruch trat schließlich im Bereich großer Querkraft und gleichzeitig großen Biegemoments durch seitliches Ausweichen des Druckgurts ein.

Zwar war so die Feuerwiderstandsdauer deutlich geringer als bei einem vergleichbaren I-Balken, der konventionell mit Umschließungsbügeln bewehrt war [1], jedoch wurde die angestrebte Feuerwiderstandsklasse F 30 sicher erreicht (Versagen nach 57 Minuten).

## 6. Zusammenfassung und Schlußbemerkungen

Die Forschungsarbeit wurde durchgeführt, um zu prüfen, ob Stahlbetonbalken, deren Schubbewehrung gem. DIN 1045 (1978), Abschn. 18.8.4 zu einem Teil aus Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartigen Schubbewehrungselementen, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", besteht, ausreichende Sicherheit unter Brandbeanspruchung aufweisen. Dazu wurden sieben Normbrandversuche an symmetrischen Zweifeld-Balken, entworfen nach DIN 4102 für F 90, durchgeführt, bei denen sich herausstellte, daß bei ungünstigem M/Q-Verhältnis mit verfrühtem Versagen gerechnet werden muß, wenn beim Entwurf der Balken die durch die Normen gestatteten Möglichkeiten

- hoher Schubzulagenanteil nach DIN 1045 (1978)
- geringe Balkenbreite nach DIN 4102 (Teil 4, 1980)

ausgenutzt werden. Verringerung des Schubzulagenanteils und/oder Vergrößerung der Balkenbreite verbessern das Brandverhalten, jedoch konnten noch keine Grenzen abgesteckt werden.

Es dürfte aus Gründen wirtschaftlichen Arbeitsablaufs und Materialeinsatzes nicht im Interesse der Praxis sein, den zulässigen Anteil der Schubzulagen gegenüber den Umschließungsbügeln zu verkleinern, die Angabe einer erforderlichen Mindest-Balkenbreite würde dagegen keine empfindliche Einschränkung der Möglichkeiten bedeuten, da die Anordnung von Schubzulagen ohnehin erst bei Balken gewisser Breite interessant ist (bei schmalen Balken behindern Schubzulagen den Betoniervorgang beträchtlich).

Aufgrund der hier und in Teil I-III der Forschungsaufgabe gewonnenen Erkenntnisse werden folgende Empfehlungen gegeben:

Für die Feuerwiderstandsklassen F 30 und F 60 bestehen gegen die Verwendung von leiterartigen Schubzulagen in Balken von mindestens 250 mm Breite keine Bedenken.

Für Balken der Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 werden in DIN 4102 Teil 4 (1980) mindestens vierschnittige Bügel gefordert. Es besteht u.E. kein dringendes Bedürfnis, diese Forderung etwa bei besonders breiten Balken zu lockern, bei denen auch unter Verwendung von Schubzulagen ein ausreichendes Brandverhalten nicht ausgeschlossen sein dürfte. Die Forderung so hoher Feuerwiderstandsklassen wird so selten gestellt, daß die derzeitigen Auflagen hinsichtlich der Schubbewehrung solcher Balken auch in wirtschaftlicher Hinsicht vertretbar sind.

Es werden jedoch Ergänzungsversuche für die wichtigste Feuerwiderstandsklasse F 90 dringend benötigt. Zunächst sollte mit der Praxis abgestimmt werden, von welcher Balkenbreite an das Konstruieren mit Schubzulagen sinnvoll und wirtschaftlich ist. Mit einer so gefundenen Mindestbalkenbreite wären dann Balken zu konzipieren und im Normbrandversuch zu testen, bei denen jeweils der größtmögliche Anteil der Schubbewehrung aus Schubzulagen besteht, und zwar müßten dann nicht nur leiterartige Elemente, wie sie bisher ausschließlich verwendet wurden, sondern auch korb- und girlandenartige Schubzulagen untersucht werden.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wird zu gegebener Zeit einen entsprechenden Finanzierungsantrag an das Ministerium für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen stellen.

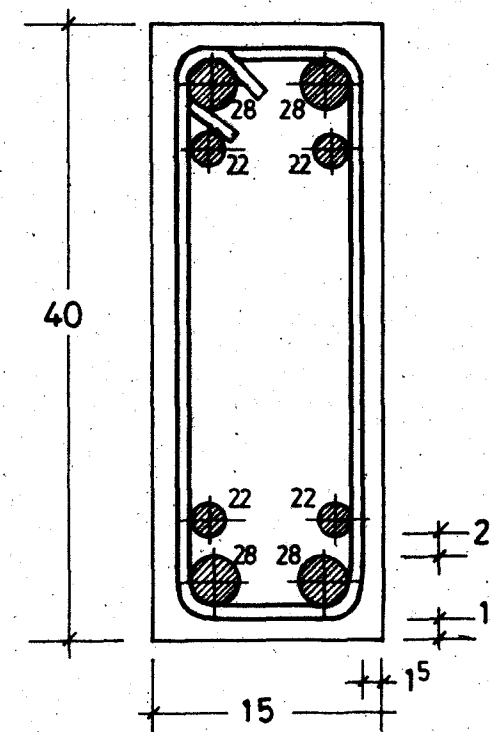
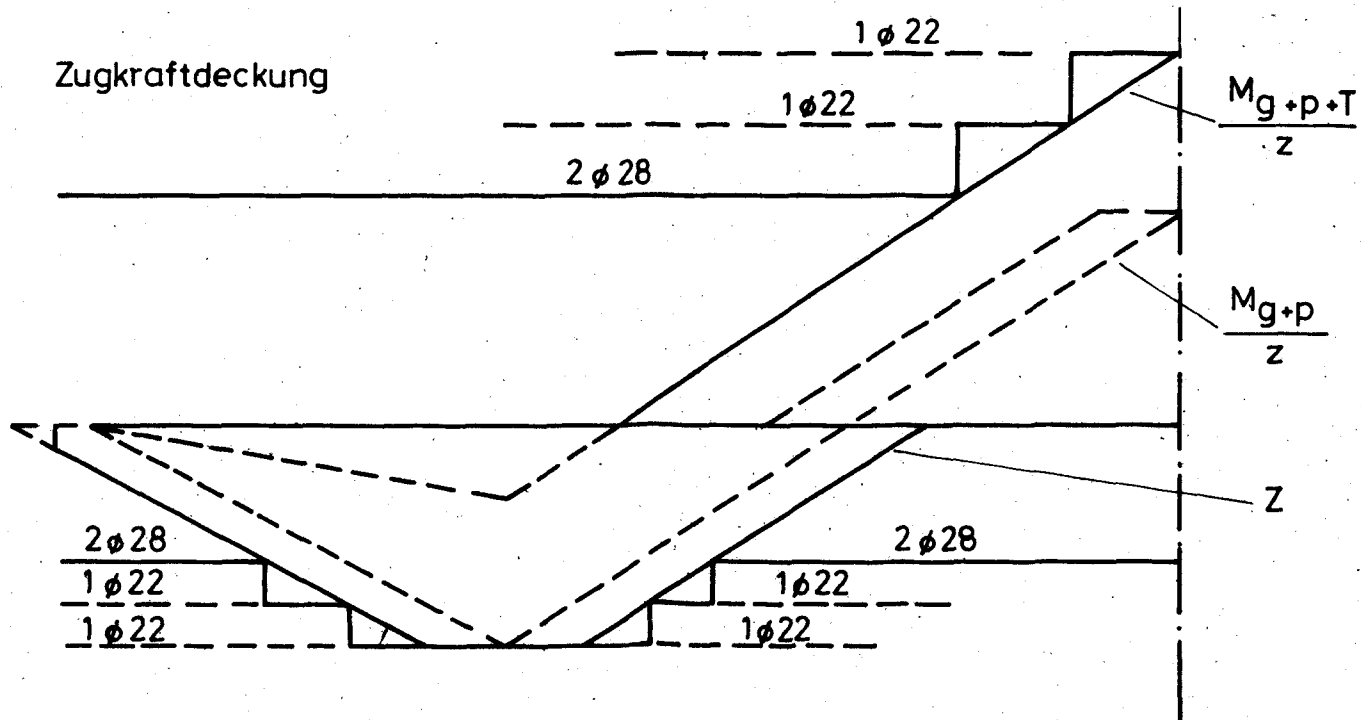
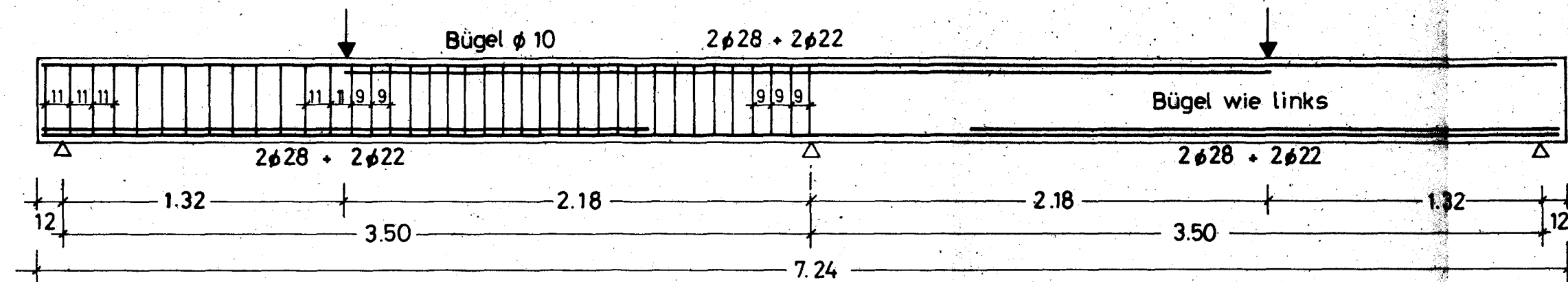
Ein weiterer Versuchskörper, Balken 8, diente zur Untersuchung, ob bei I-Balken, deren Steg keine Umschließungsbügel, sondern nur eine einschnittige Schubzulage aufweist, ausreichendes Schubverhalten unter Brandbeanspruchung gegeben ist. Da für eine solche Ausbildung nach DIN 1045, Abschnitt 18.8.4 die obere Begrenzung mit  $t = 80$  mm festgelegt ist, nach DIN 4102 Teil 4 (1980) für die geringste Feuerwiderstandsklasse F 30 eine Mindeststegbreite  $t = 80$  gefordert wird, war im Rahmen dieser Forschungsarbeit nur diese eine Stegbreite zu untersuchen. Es ergab sich im Normbrandversuch eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit, und es ist nicht erforderlich, bei so konstruierten I-Balken Einschränkungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit im Sinne von DIN 4102 zu formulieren.

L i t e r a t u r

- [1] Krampf, L.: Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung, Teil I-III,  
Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979.
- [2] DIN 1045 "Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung",  
Fassung Dezember 1978.
- [3] Rehm, G., Eligehausen, R., Neubert, B.: Neue Bewehrungsrichtlinien; Erläuterung der Neubearbeitung DIN 1045, Abschn. 18,  
Beton-Verlag, 1977.
- [4] DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen"  
Teil 2 "Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen",  
Fassung 1977.  
Teil 4 "Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile", Fassung 1980.
- [5] Kani, G.: Was wissen wir heute über die Schubbruchsicherheit,  
Bauingenieur Heft 5, 1968.
- [6] Selvaggio, S.L., Carlson, C.C.: Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams, Study B, Influence of Aggregate and Load Intensity, Portland Cement Ass., Research Department,  
Bull. 171, Skokie (Ill.), 1964.
- [7] Rehm, G., Eligehausen, R., Neubert, B.: Rationalisierung der Bewehrungstechnik im Stahlbetonbau; Vereinfachte Schubbewehrung in Balken, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 3, 1978.
- [8] Rehm, G., Eligehausen, R., Neubert, B.: Rationalisierung der Bewehrungstechnik. Berichte über Balkenversuche. Institut für Baustoffkunde und Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 1973, 1974, 1975.
- [9] Ehm, H.: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen.  
Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1967.

Verzeichnis der Anlagen

1.1 - 1.8	Bewehrungspläne
2.1, 2.2	Versuchsaufbau
3.1 - 3.8	Bügeltemperatur
4.2 - 4.7	Temperatur der Schubzulagen
5.1 - 5.8	Vertikalverformung



Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d,  
Bügelhaken φ 30!

① 2+2=4 φ 28, L = 7,20m

② 1+1=2 φ 22, L=4,04m

② 1φ22

③ 1+1=2 φ 22, L = 2,85m

④ 1+1=2 φ 22, L = 2,65m

① 2φ28

③ 1φ22

④ 1φ22

Stahlliste

Nr. Stck.

1	4
2	2
3	2
4	2
5	73

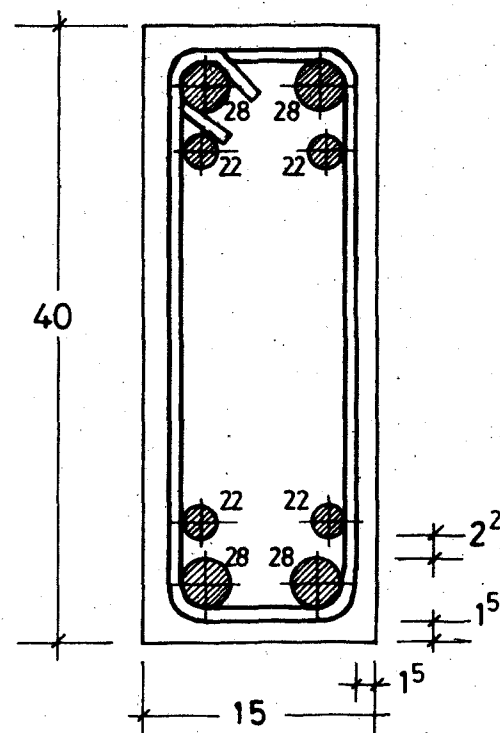
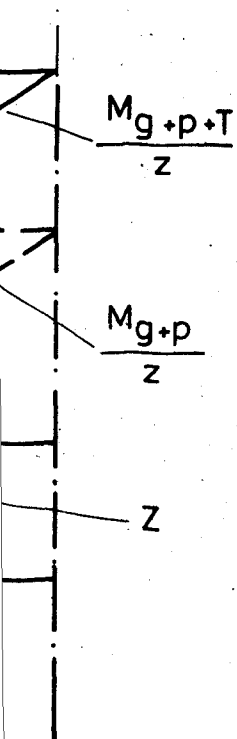
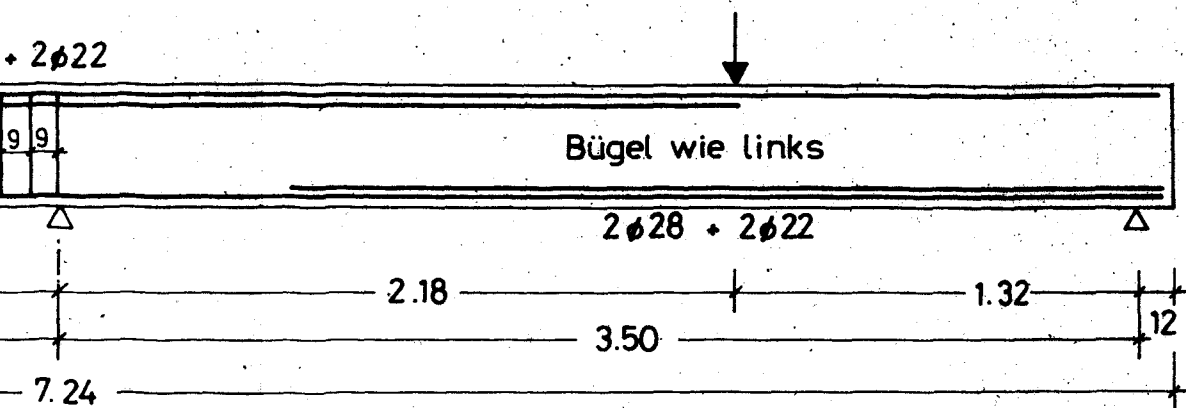
246 kg BS

B 25, St 4

Schubvers

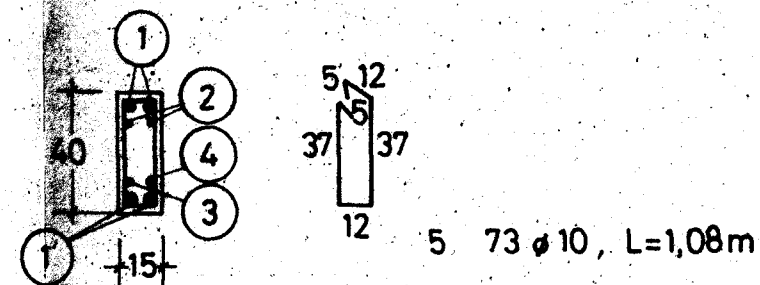
Institut  
Amtl





Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d,  
Bügelhaken  $\phi$  30!



### Stahlliste

Nr.	Stck.	$\phi$	L	$\phi$ 10	$\phi$ 22	$\phi$ 28
1	4	28	7,20			28,80
2	2	22	4,04		8,08	
3	2	22	2,85		5,70	
4	2	22	2,65		5,30	
5	73	10	1,08	79,00		
m:				79,00	19,10	28,80
kg:				49	57	140

246 kg BSt 420/500

B 25 , St 420/ 500

③ 1  $\phi$  22

④ 1  $\phi$  22

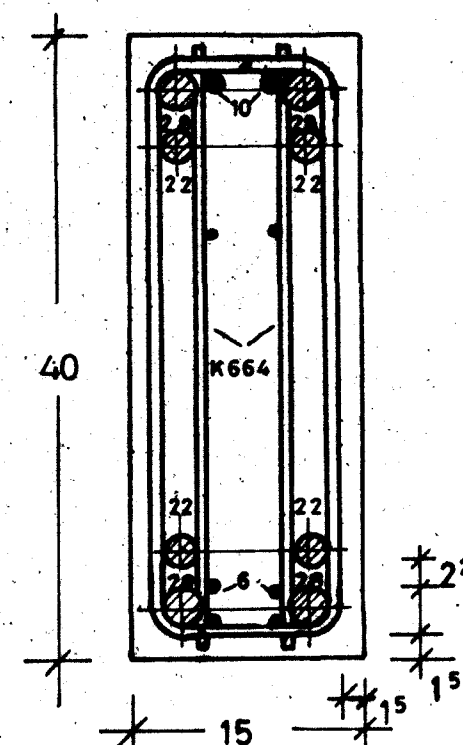
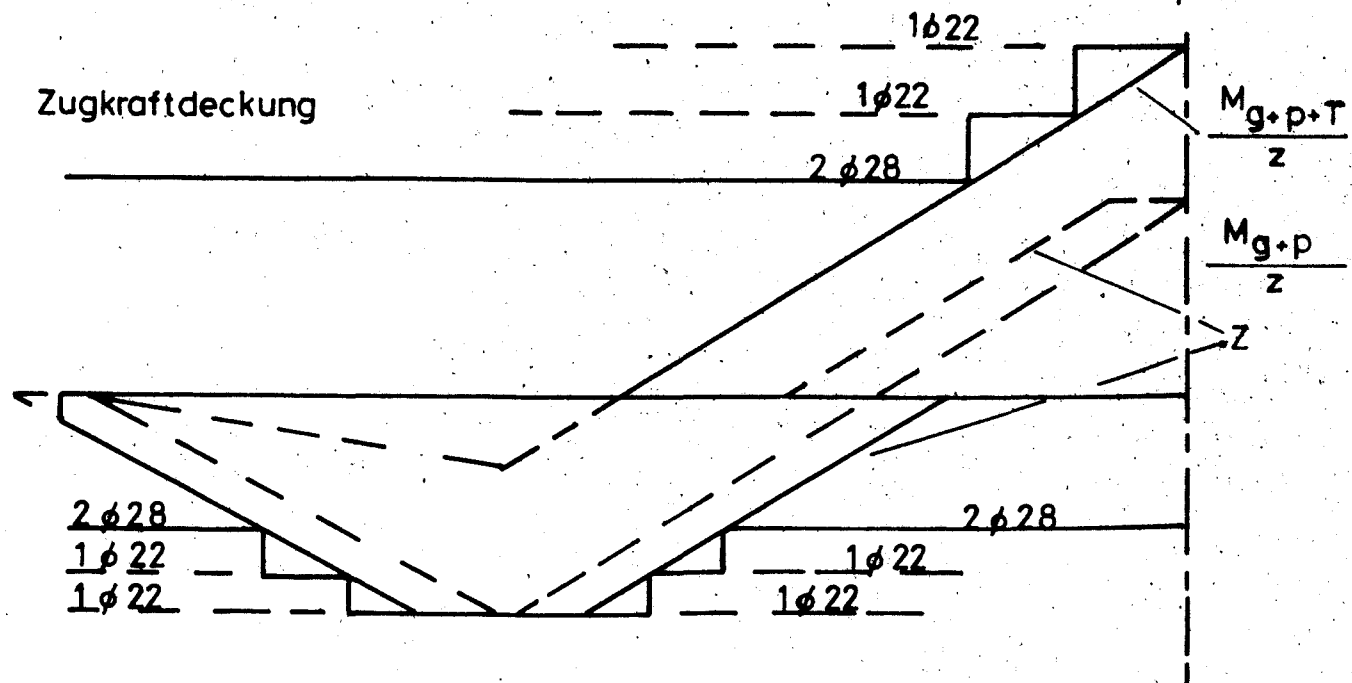
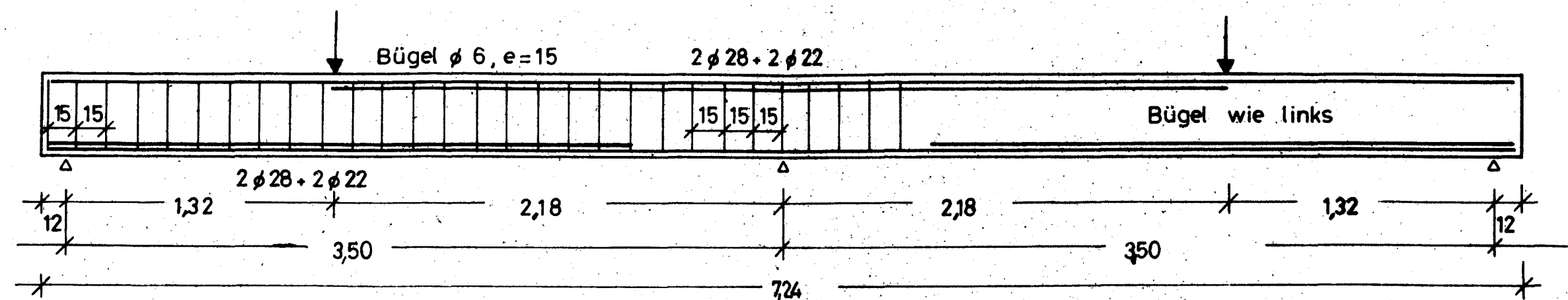
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 1

Bewehrungsplan

Anlage 1.1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

Schubleitern:  
2 BStG K 664  
mit angeschweißten  
Verankerungsstäben

① 2+2 = 4  $\phi 28$ , L = 7,20 m

② 1+1 = 2  $\phi 22$ , L = 4,04 m

② 1  $\phi 22$

③ 1+1 = 2  $\phi 22$ , L = 2,85 m

③ 1  $\phi 22$

④ 1+1 = 2  $\phi 22$ , L = 2,65 m

④ 1  $\phi 22$

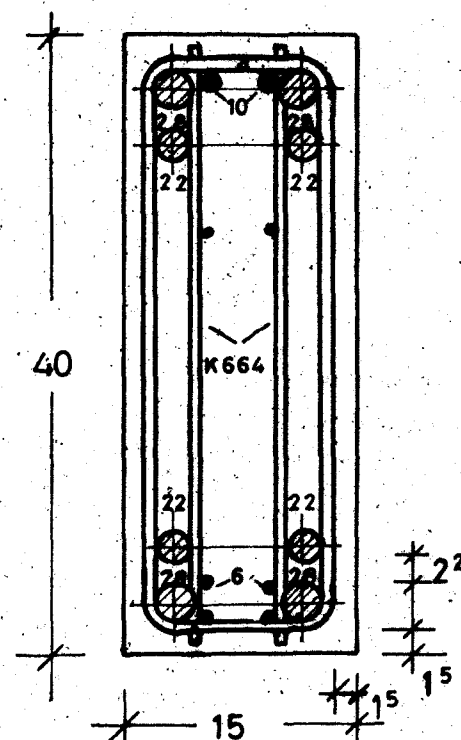
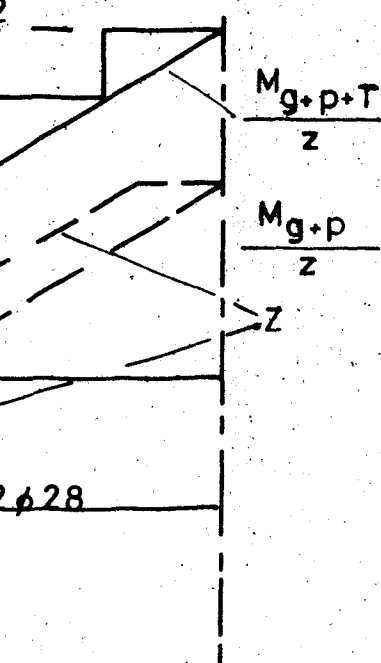
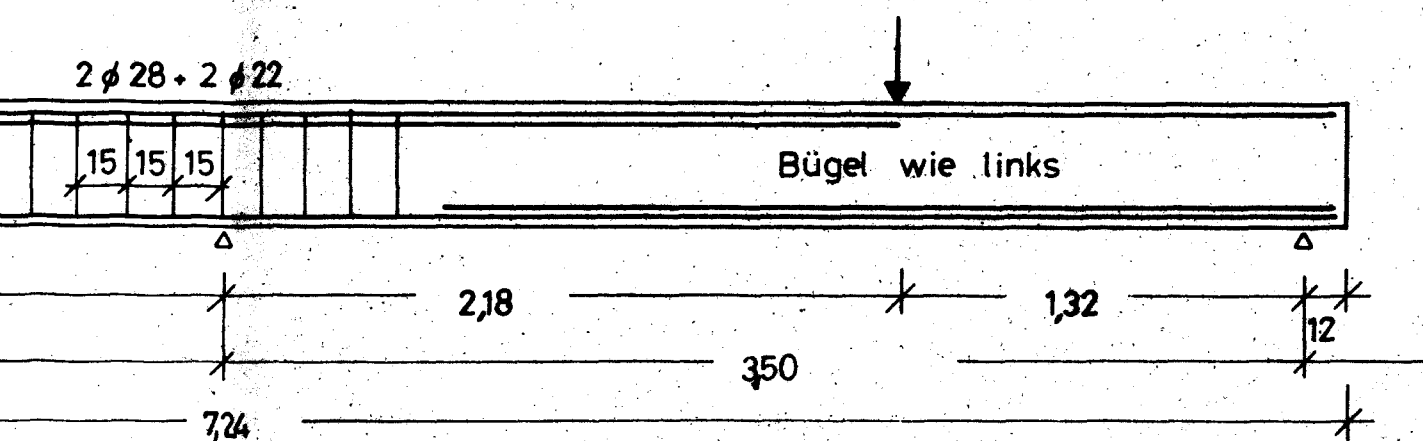
① 2  $\phi 28$

B 25, St

Schubv

Inst

A



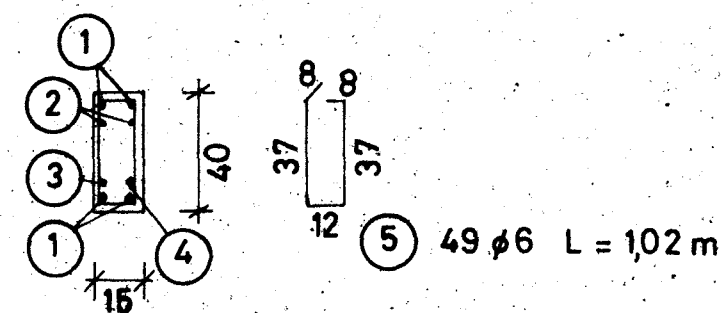
Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

Schubleitern:  
2 BStG K664  
mit angeschweißten  
Verankerungsstäben

③ 1  $\phi 22$

④ 1  $\phi 22$



### Stahlliste

Nr.	Stck.	$\phi$	L	$\phi 6$	$\phi 22$	$\phi 28$
1	4	28	7,20			28,80
2	2	22	4,04		8,08	
3	2	22	2,85		5,70	
4	2	22	2,65		5,30	
5	49	6	1,02	50,00		
m				50,00	19,08	28,80
kg				11	57	140

208 kg St 42/50

1 Matte BStG K664 (70 kg)

B 25, St 420/500

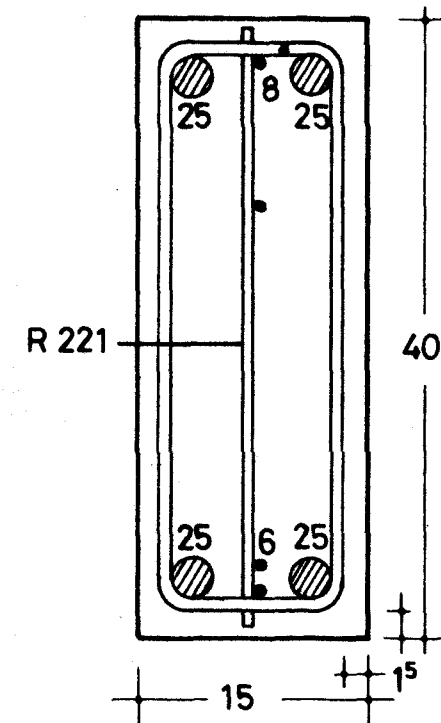
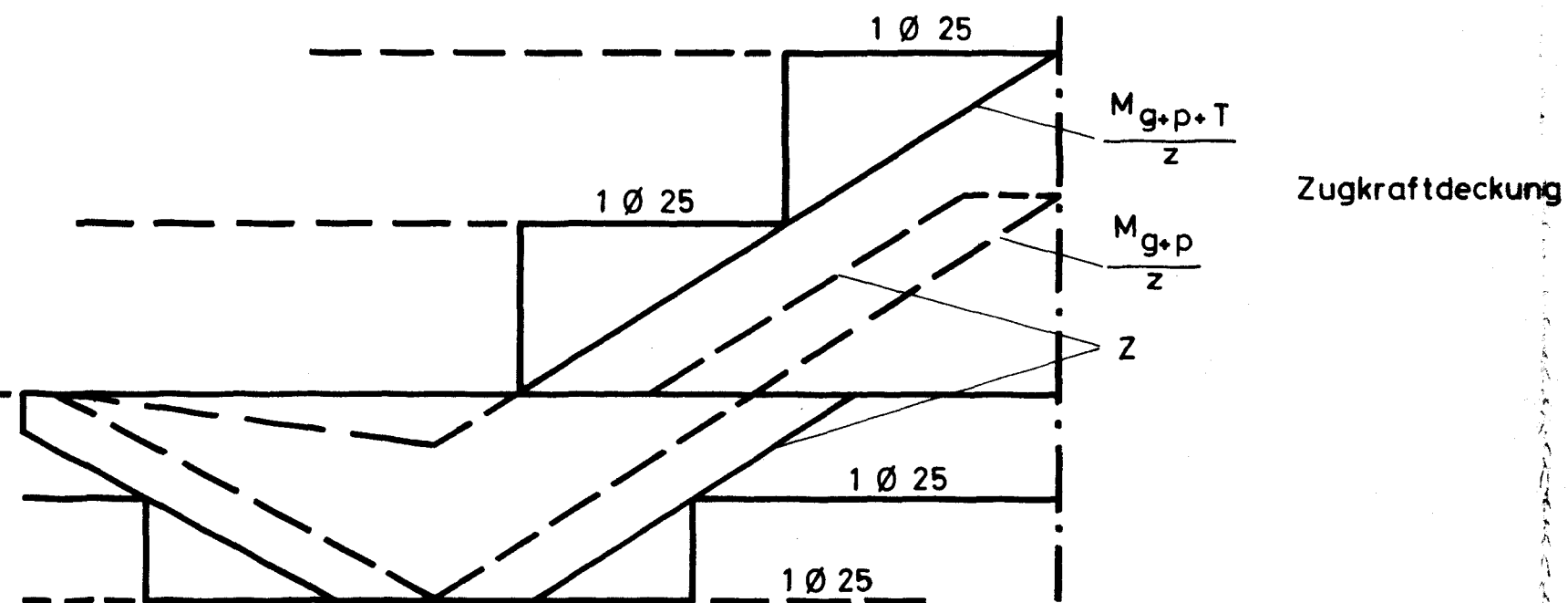
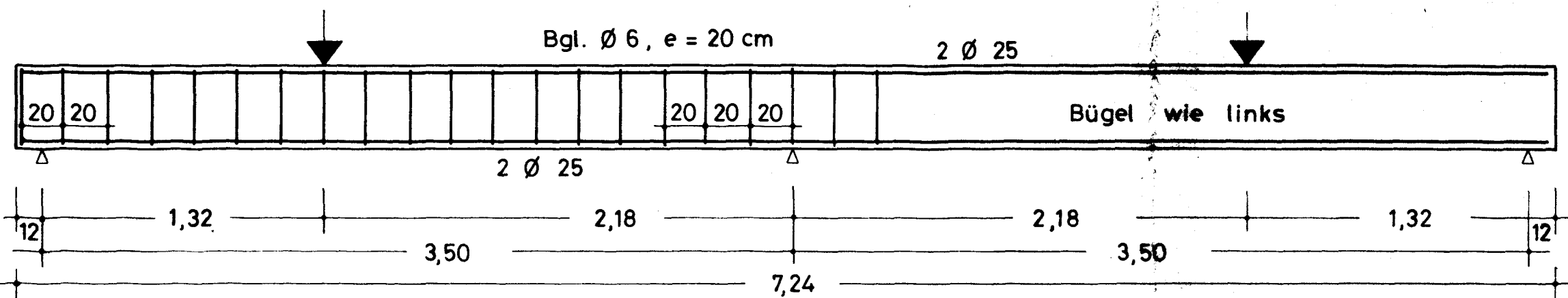
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 2

Bewehrungsplan

Anlage 1.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amplitude



Querschnitt M 25

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5 d

Schubleiter BStG  
R 221

mit angeschweißten  
Verankerungsstäben

① 1  $\varnothing 25$ ,  $L = 7,20$  m

② 1  $\varnothing 25$ ,  $L = 5,24$  m

③ 1+1+1=3  $\varnothing 6$ ,  $L = 1,10$  m

④ 1+1=2  $\varnothing 25$ ,  $L = 3,20$  m

⑤ 1+1=2  $\varnothing 25$ ,  $L = 3,60$  m

③ 1  $\varnothing 6$

④ 1  $\varnothing 25$

⑤ 1  $\varnothing 25$

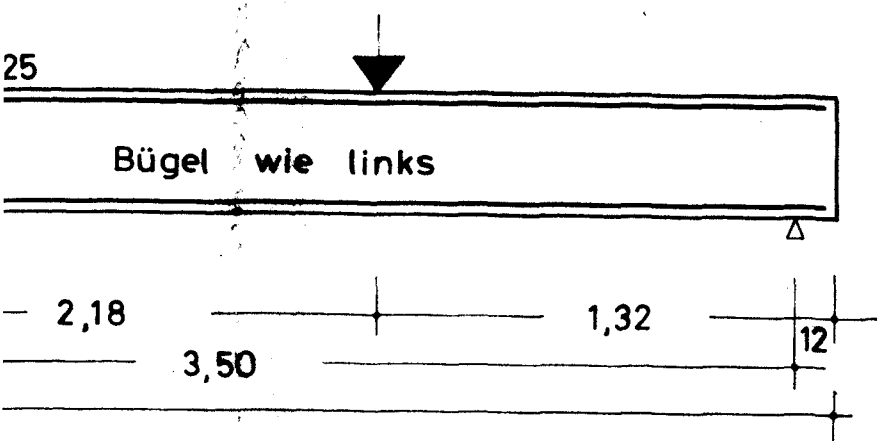
③ 1  $\varnothing 6$

B 25, St 420 / 50

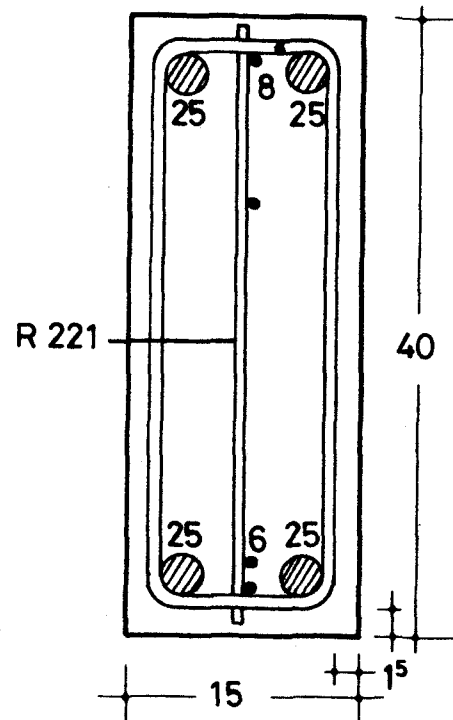
Schubversagen

Bew

Institut für B  
Amtliche M



igkraftdeckung



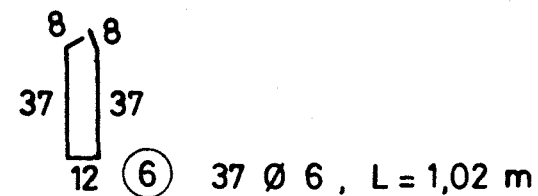
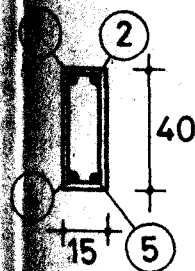
Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5 d

Schubleiter BStG

R 221

mit angeschweißten  
Verankerungsstäben



### Stahlliste

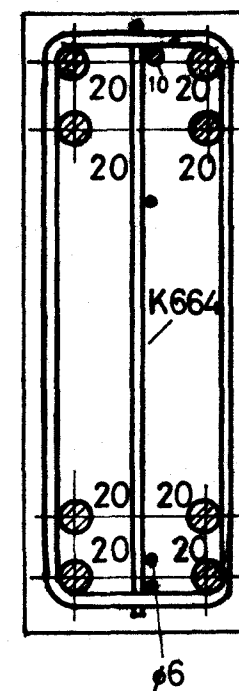
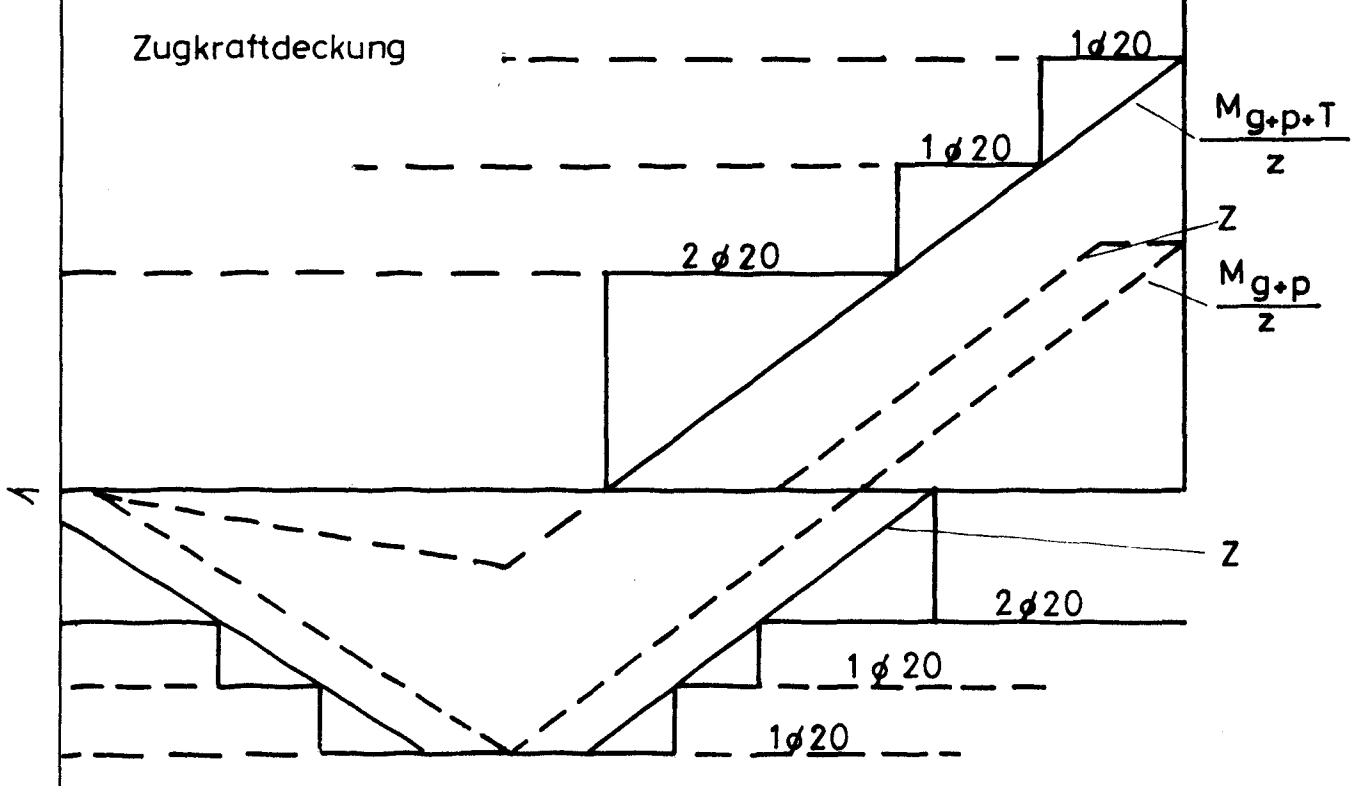
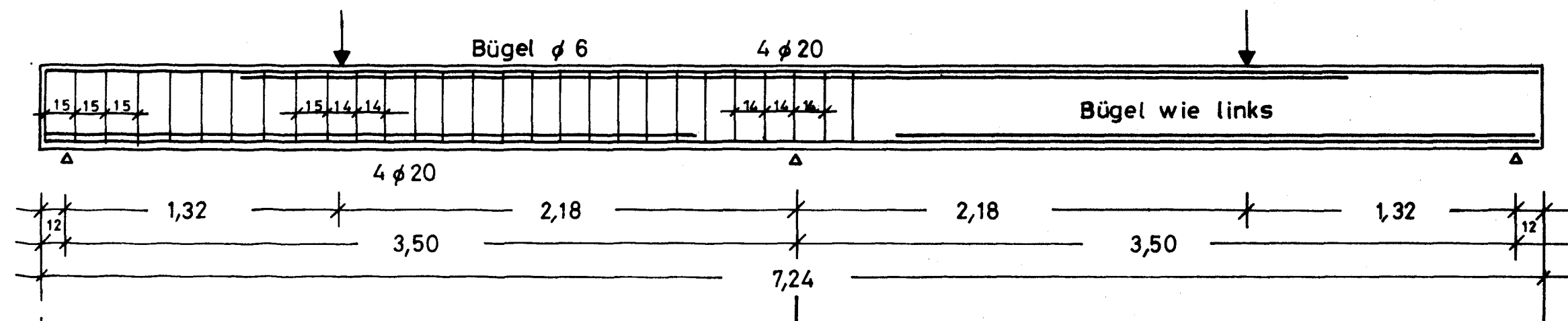
Nr.	Stck.	Ø	L	6	25
1	1	25	7,20		7,20
2	1	25	5,24		5,24
3	3	6	1,10	3,30	
4	2	25	3,20		6,40
5	2	25	3,60		7,20
6	37	6	1,02	38,00	
m :				41,30	26,04
kg :				9	101

110 kg St 42 50  
1 Matte BStG R 221 (22 kg)

3 1 Ø 6

B 25, St 420 / 500

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 3
Bewehrungsplan	Anlage 1.3
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Querschnitt M 1: 5

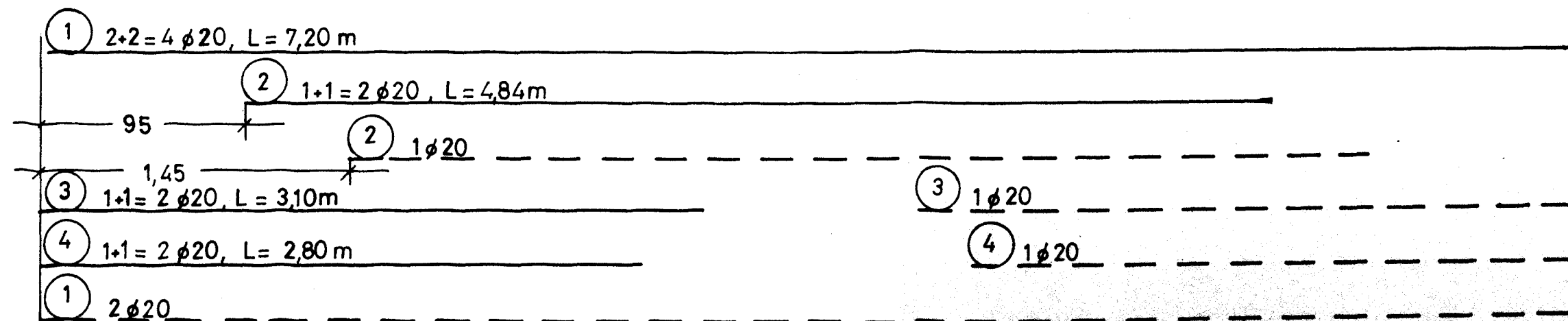
Biegerollendurchmesser

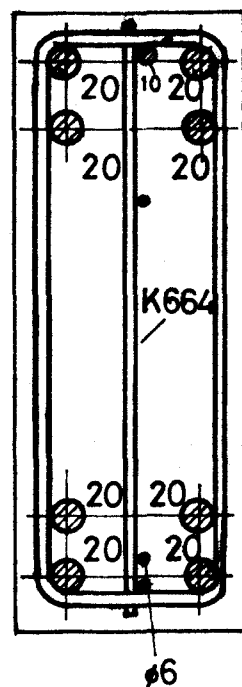
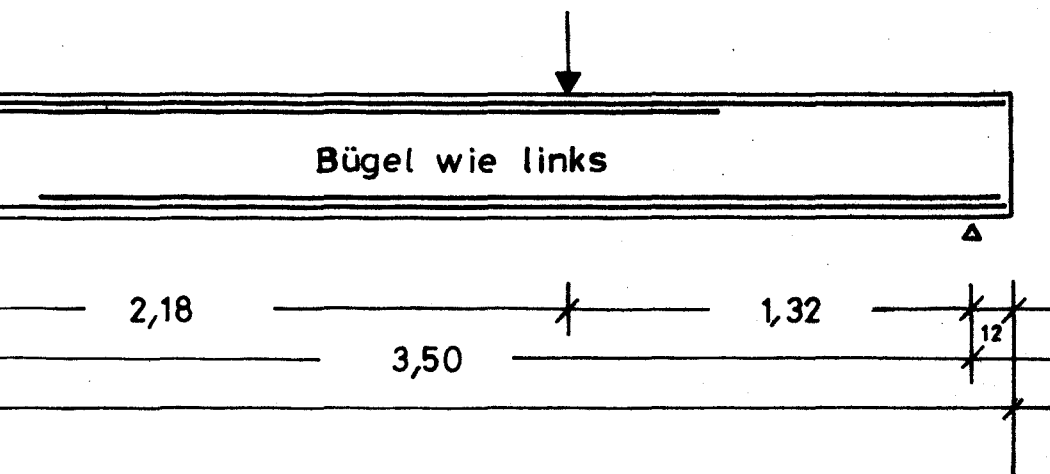
der Bügel: 5d

Schubleiter BStG K 664

mit angeschweißten

Verankerungsstäben





Querschnitt M 1: 5

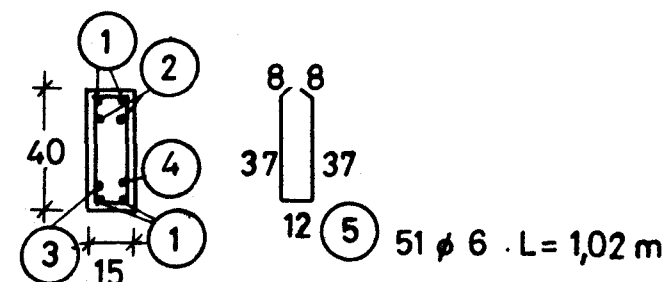
Biegerollendurchmesser

der Bügel: 5d

Schubleiter BStG K 664

mit angeschweißten

Verankerungsstäben



# Stahlliste

Nr	Stck	ø	L	ø 6	ø 20
1	4	20	7,20		28,80
2	2	20	4,84		9,68
3	2	20	3,10		6,20
4	2	20	2,80		5,60
5	51	6	1,02	52,00	

m: 52,00 50,28

kg: 12,00 124,00

136 kg BSt. 42/50

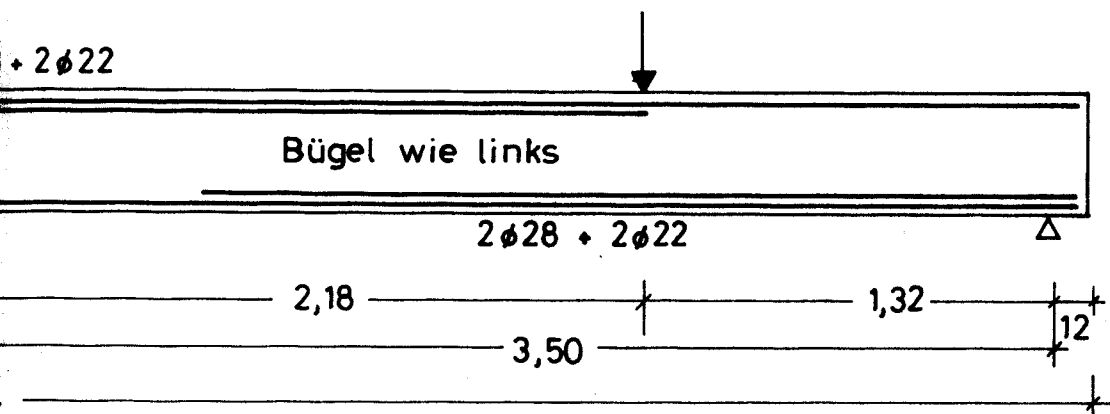
1 Matte BStG K 664 (70kg)

B 15, St 420 / 500

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 4
Bewehrungsplan	Anlage 1.4
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



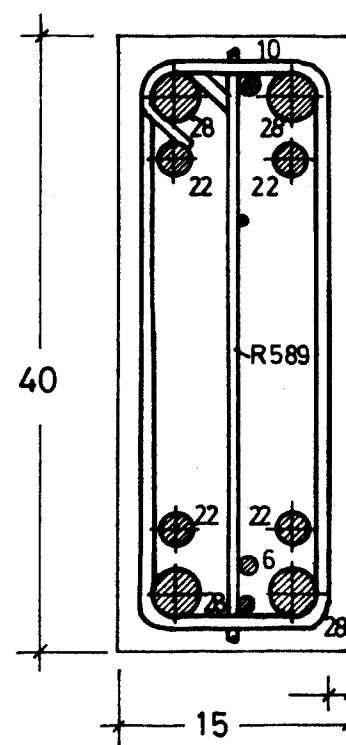




$$\frac{M_{g+p+T}}{Z}$$

$$\frac{M_{g+p}}{Z}$$

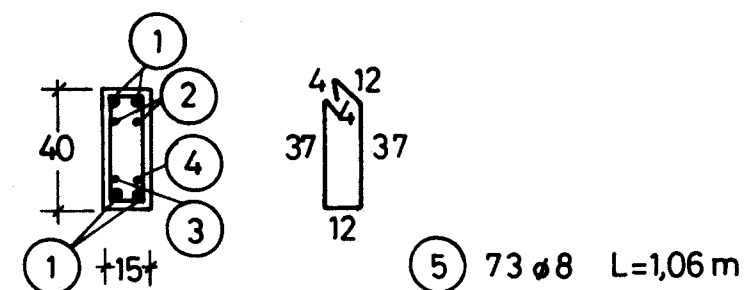
Z



Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d  
Bügelhaken ø 30 !

Schubleiter :  
BStG R 589  
mit angeschweißten  
Verankerungsstäben



### Stahlliste

Nr	Stck.	ø	L	ø8	ø22	ø28
1	4	28	7,20			28,80
2	2	22	4,04		8,08	
3	2	22	2,85		5,70	
4	2	22	2,65		5,30	
5	73	8	1,06	77,50		
m :				77,50	19,08	28,80
kg :				31	57	140

228 kg St 420 / 500

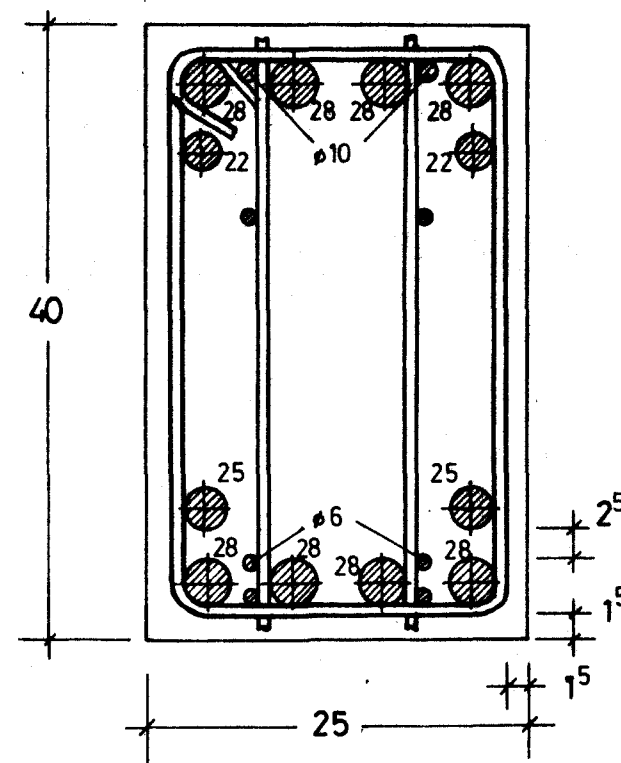
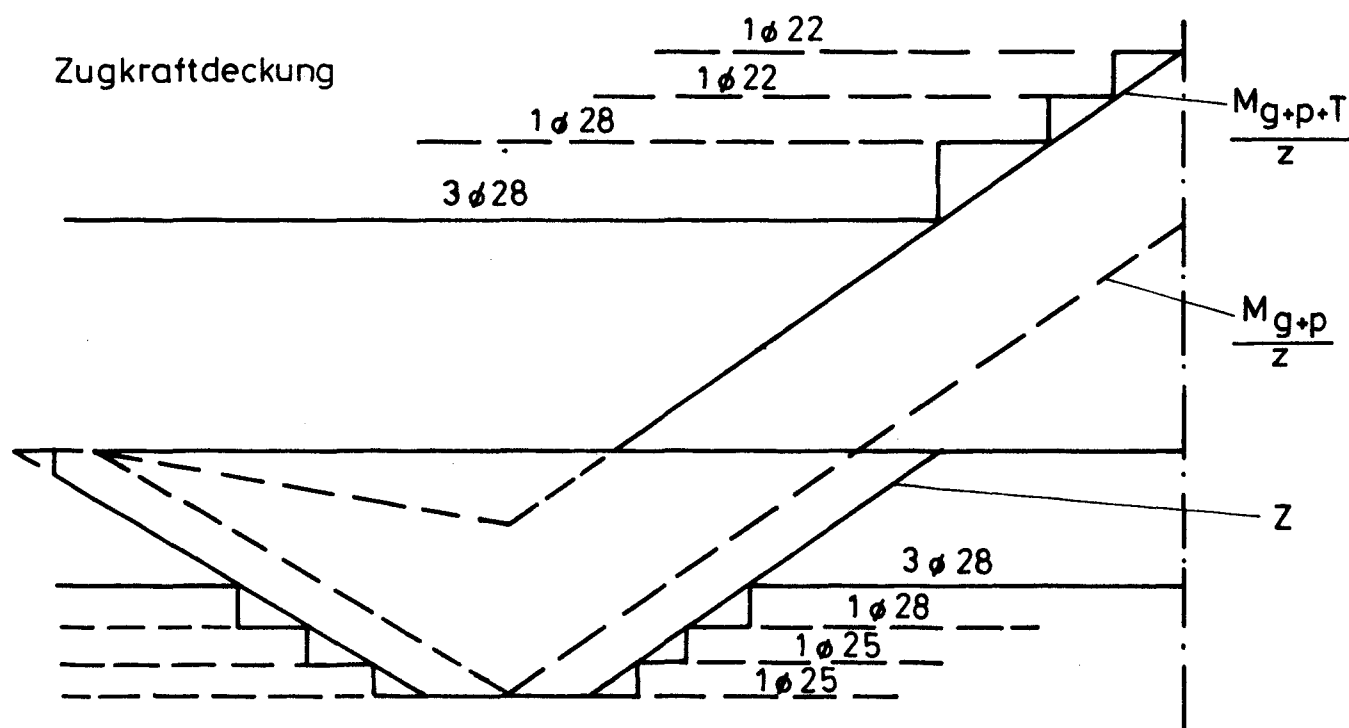
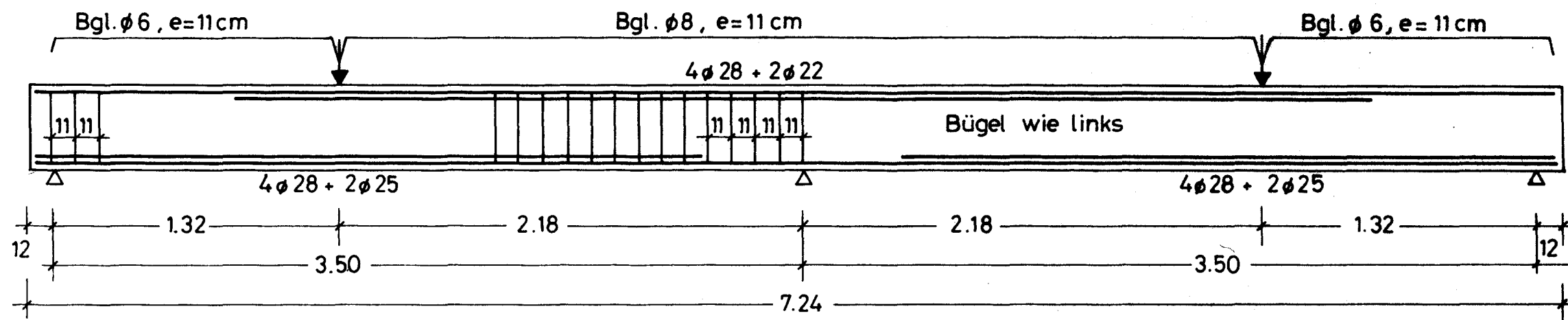
1Matte BStG R 589 68 kg

B25, St 420/500

(3) 1 ø 22

(4) 1 ø 22

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 5
Bewehrungsplan	Anlage 1.5
Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Querschnitt 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d  
Bügelhaken  $\phi 30$ !

Schubleitern  
2 K 884 BStG  
mit angeschweißten  
Verankerungsstäben

① 3+3=6  $\phi 28$ , L=7.20m

② 1  $\phi 28$ , L=5.34m

③ 1+1=2  $\phi 22$ , L=3.60m

③ 1  $\phi 22$

④ 1+1=2  $\phi 28$ , L=3.15m

④ 1  $\phi 28$

⑤ 1+1=2  $\phi 25$ , L=2.85m

⑤ 1  $\phi 25$

⑥ 1+1=2  $\phi 25$ , L=2.65m

⑥ 1  $\phi 25$

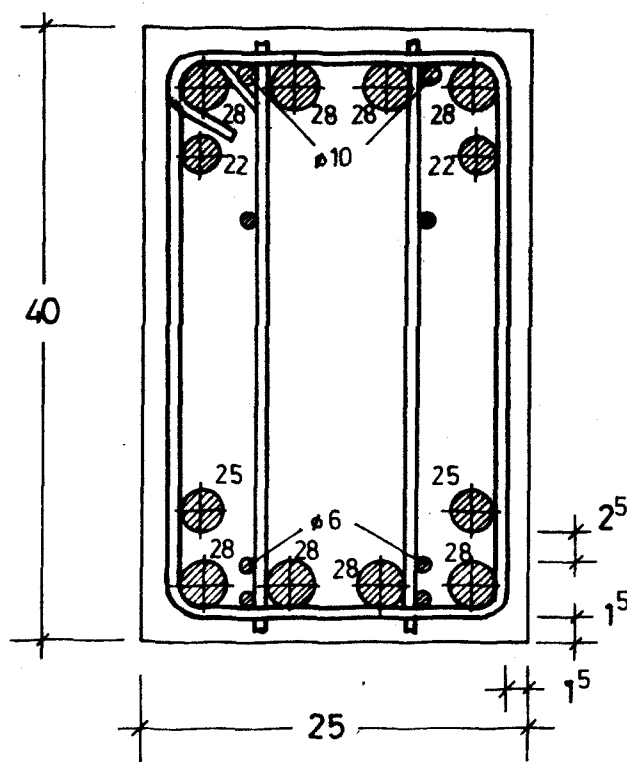
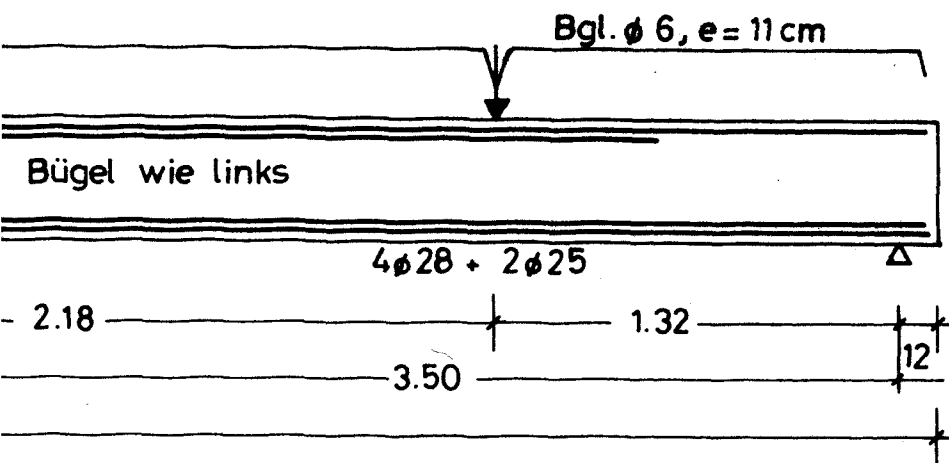
① 3  $\phi 28$

B 25,

Schubv

Insti

Ar



Querschnitt 1:5

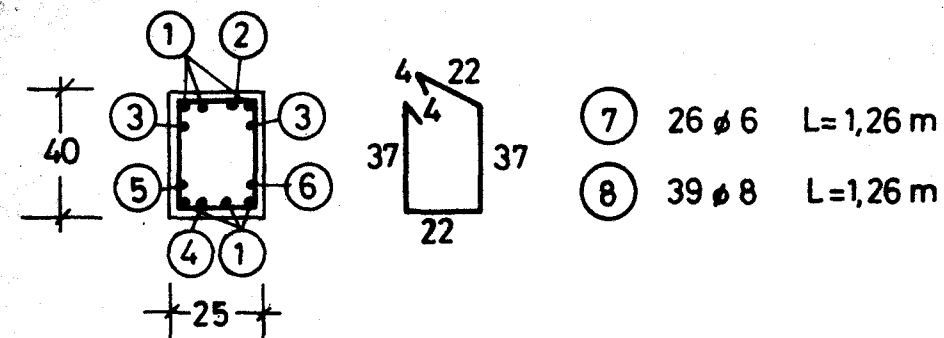
Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d  
Bügelhaken ø 30!

Schubleitern  
2 K 884 BStG  
mit angeschweißten  
Verankerungsstäben

1 ø 28

⑤ 1 ø 25

⑥ 1 ø 25



### Stahlliste

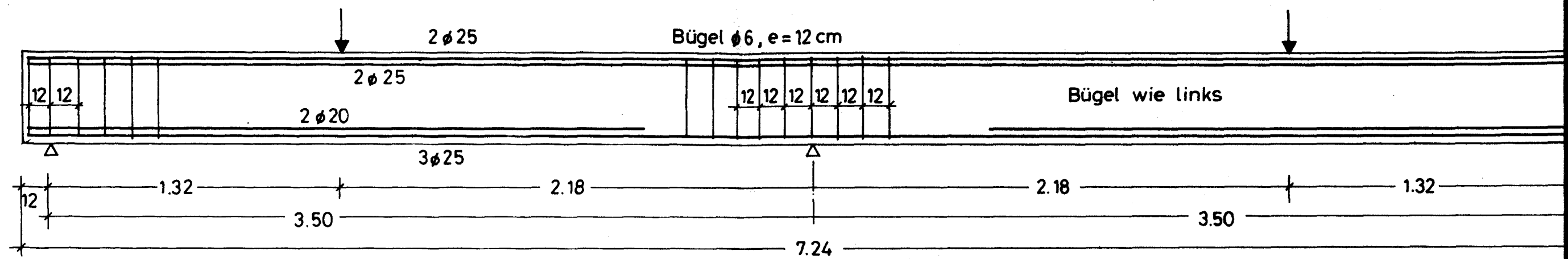
Nr.	Stck	ø	L	ø6	ø8	ø22	ø25	ø28
1	6	28	7,20					43,20
2	1	28	5,34					5,34
3	2	22	3,60			7,20		
4	2	28	3,15					6,30
5	2	25	2,85				5,70	
6	2	25	2,65				5,30	
7	26	6	1,26	32,80				
8	39	8	1,26		49,20			
m:				32,80	49,20	7,20	11,00	54,84
kg:				8	20	22	43	265

358 kg St 420/500

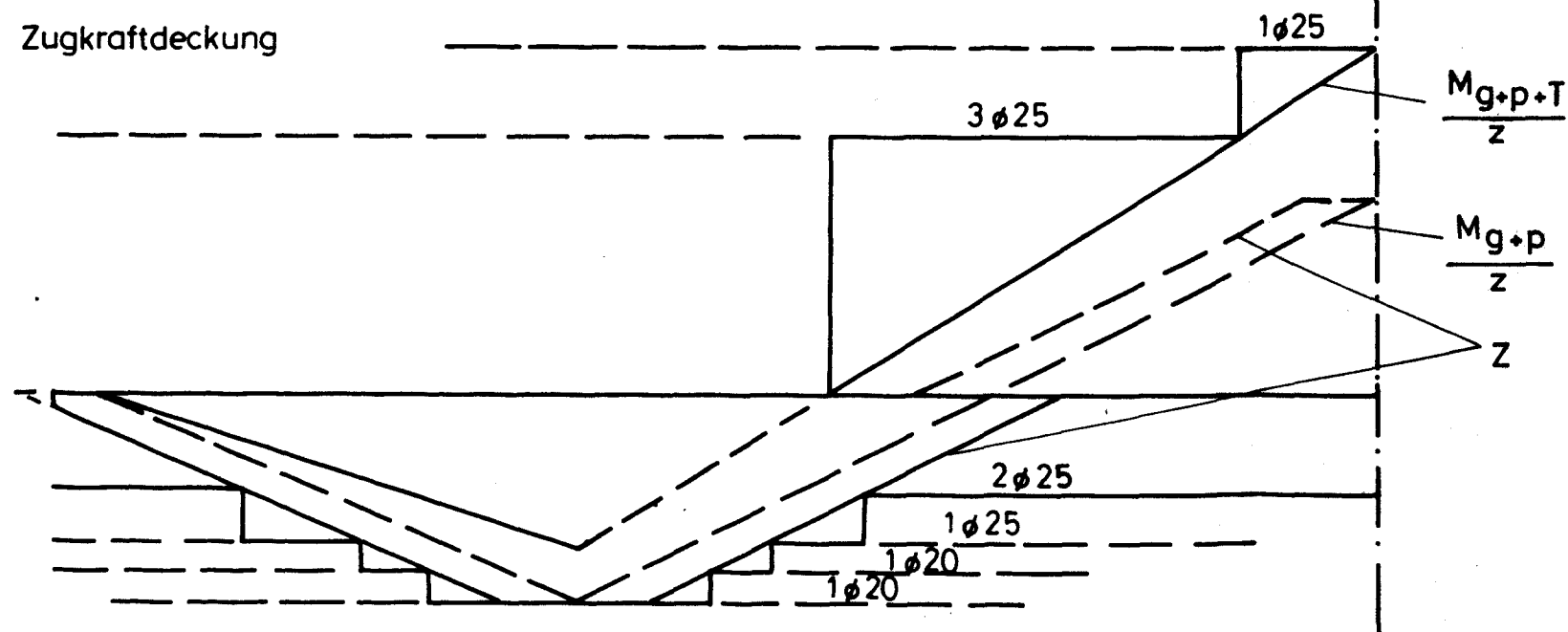
1 Matte K 884 — 93 kg St 500/550

B 25, St 420/500

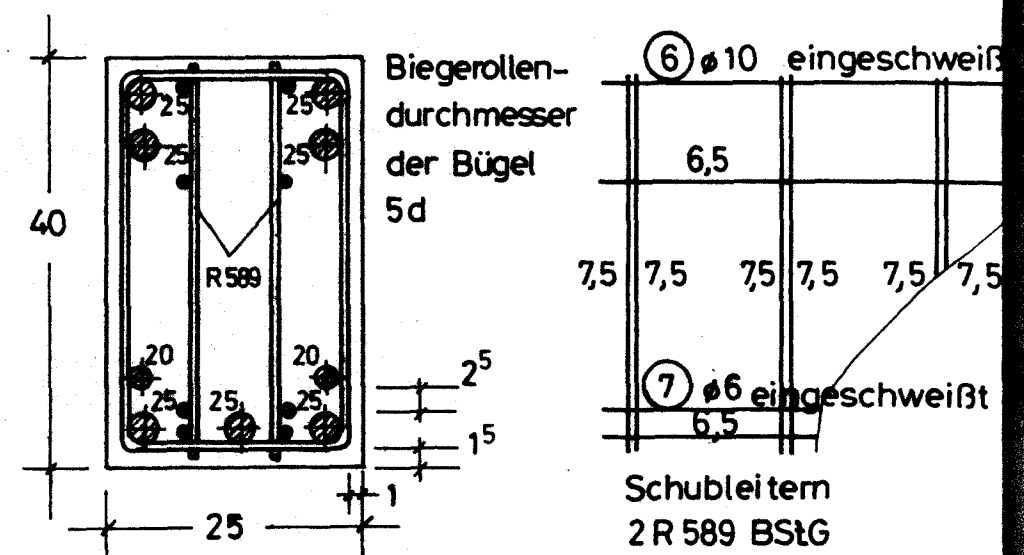
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 6
Bewehrungsplan	Anlage 1.6
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Zugkraftdeckung



Querschnitt M 1:7,5



① 3+2=5ø25, L=7,20m

② 1ø25, L=5,14m

③ 1+1=2ø25 L=3,25m

④ 1+1=2ø20 L=2,80m

⑤ 1+1=2ø20 L=2,45m

① 2ø25

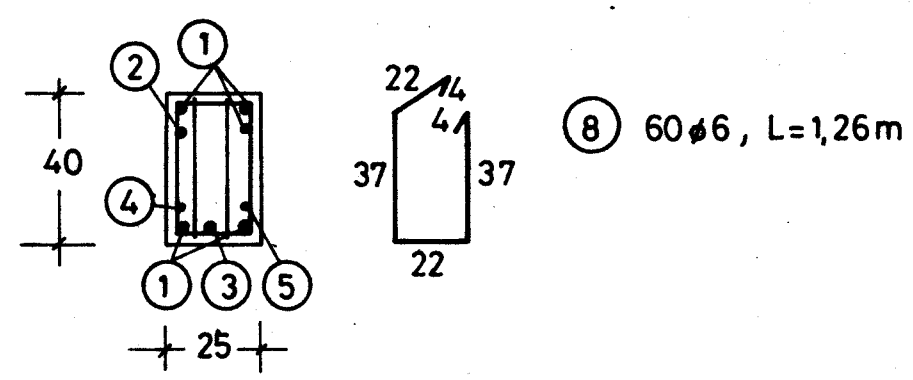
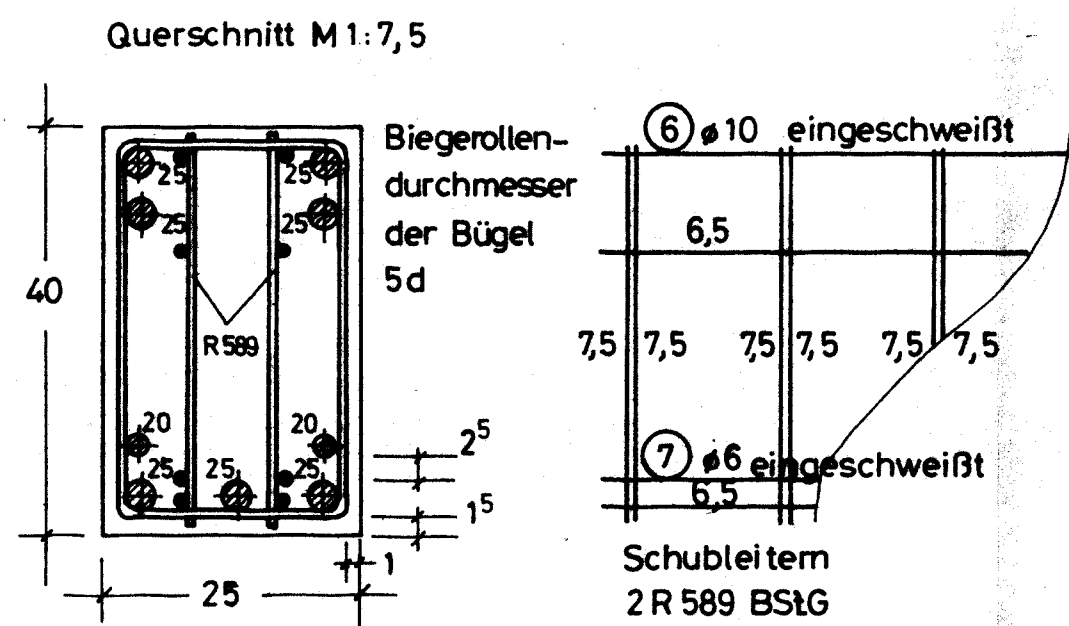
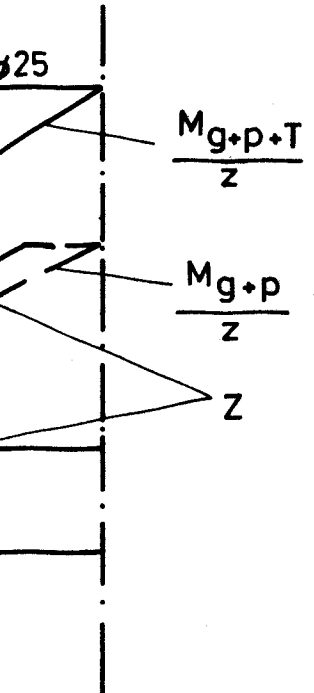
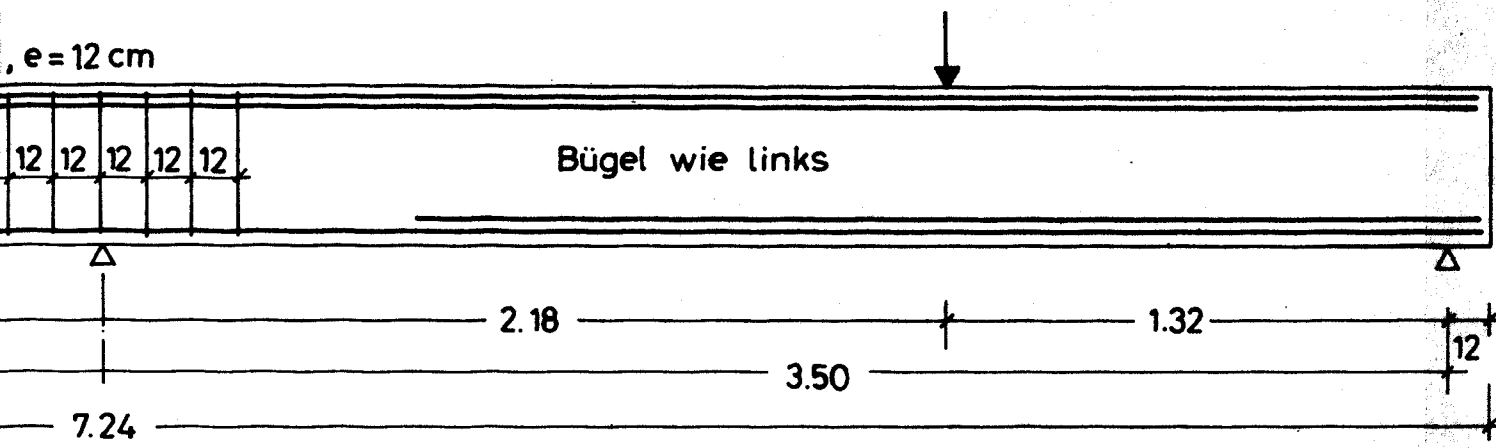
③ 1ø25

④ 1ø20

⑤ 1ø10

Schub

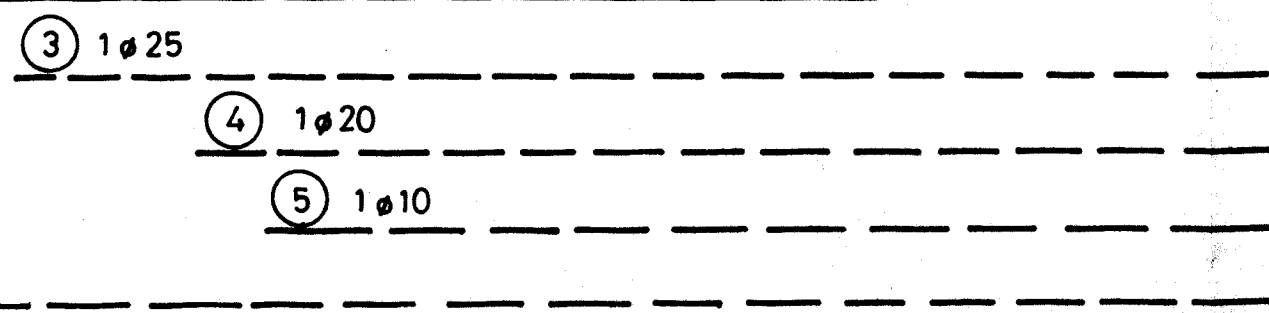
Ins



### Stahlliste

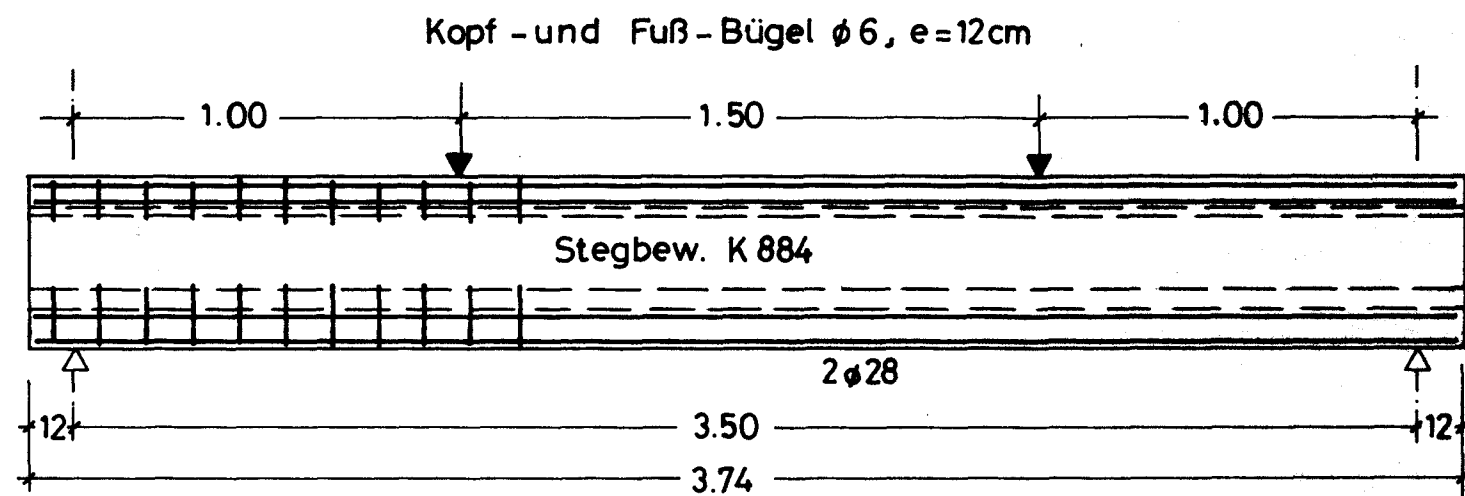
Nr.	Stck	$\phi$	L	$\phi 6$	$\phi 10$	$\phi 20$	$\phi 25$
1	5	25	7,20				36,00
2	1	25	5,15				5,15
3	2	25	3,25				6,50
4	2	20	2,80			5,60	
5	2	20	2,45			4,90	
6	2	10	7,20		14,40		
7	2	6	7,20	14,40			
8	60	6	1,26	75,60			
m:				90,00	14,40	10,50	47,65
kg:				20	9	26	185

240 kg St 420 / 500  
1 Matte R 589 — 68 kg St 500 / 550



B 25 , St 420/500

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 7
Bewehrungsplan	Anlage 1.7
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

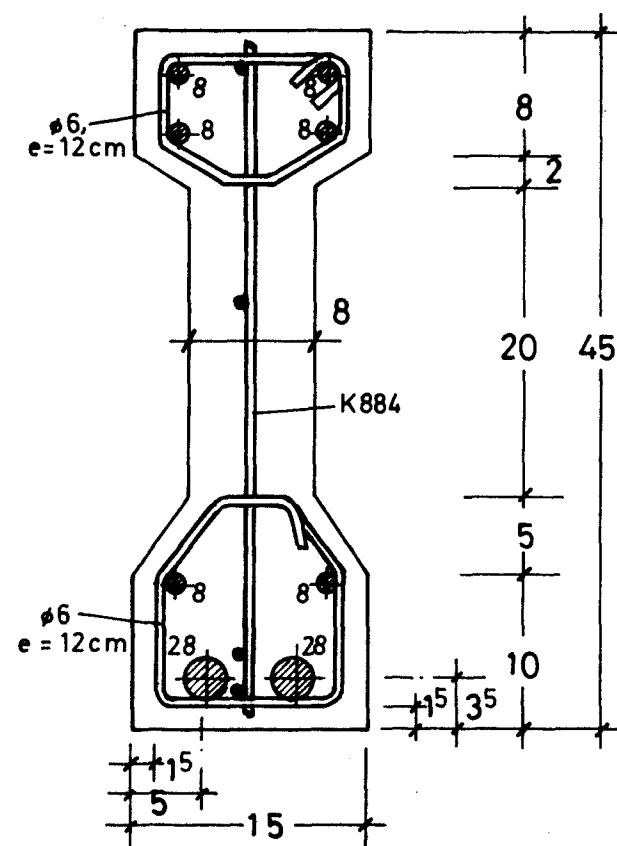


① 6  $\phi 8$ ,  $L=3.70\text{m}$

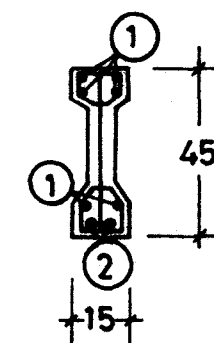
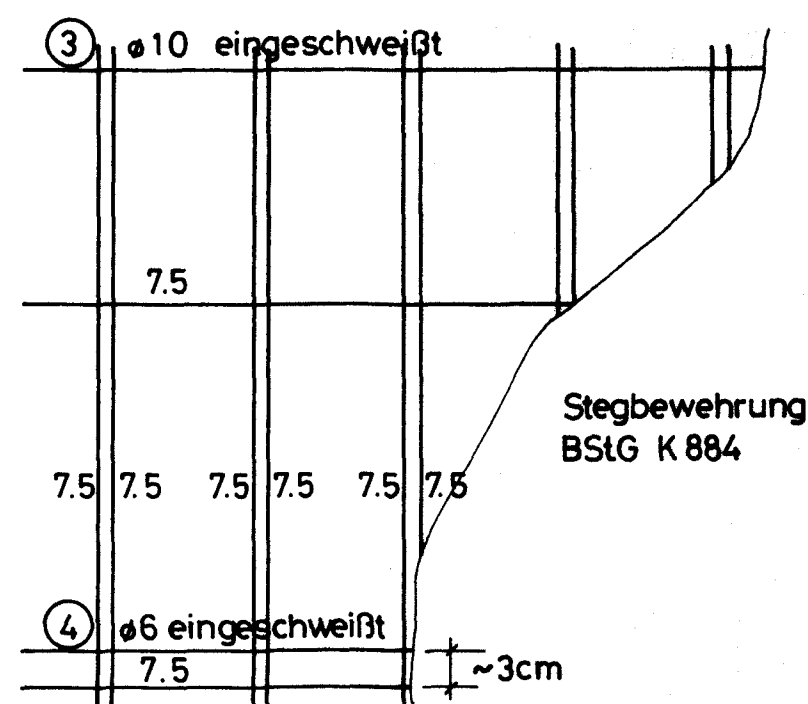
3.70

② 2  $\phi 28$ ,  $L=3.70$

3.70



Querschnitt M 1:5



⑤ 31  $\phi$   $L=0.40$



⑥ 31  $\phi$   $L=0.65$

# Stahllis

Nr.	Stck.	$\phi$	L
1	6	8	3,70
2	2	28	3,70
3	1	10	3,70
4	1	6	3,70
5	31	6	0,40
6	31	6	0,65

m:

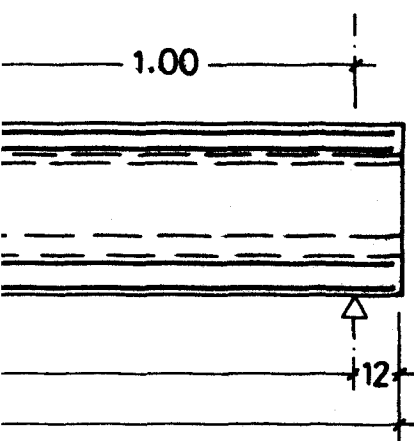
kg:

1 Mitte K884

Schub

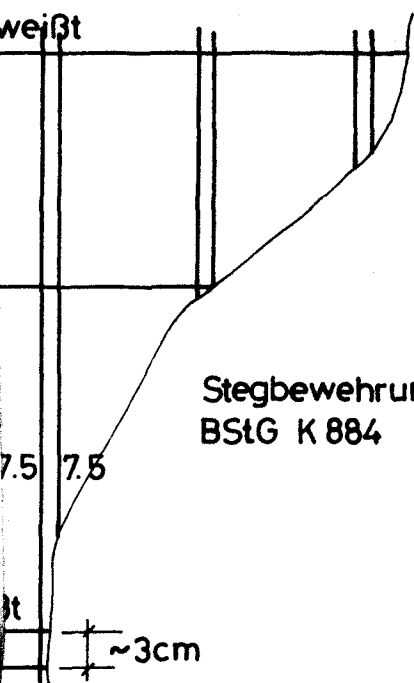
Ins



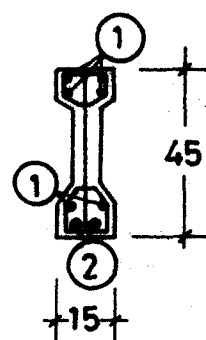


3.70

3.70



Stegbewehrung  
BStG K 884



⑤ 31  $\phi$  6, L=0.40m



⑥ 31  $\phi$  6, L=0.65m

nach Schablone biegen

### Stahlliste

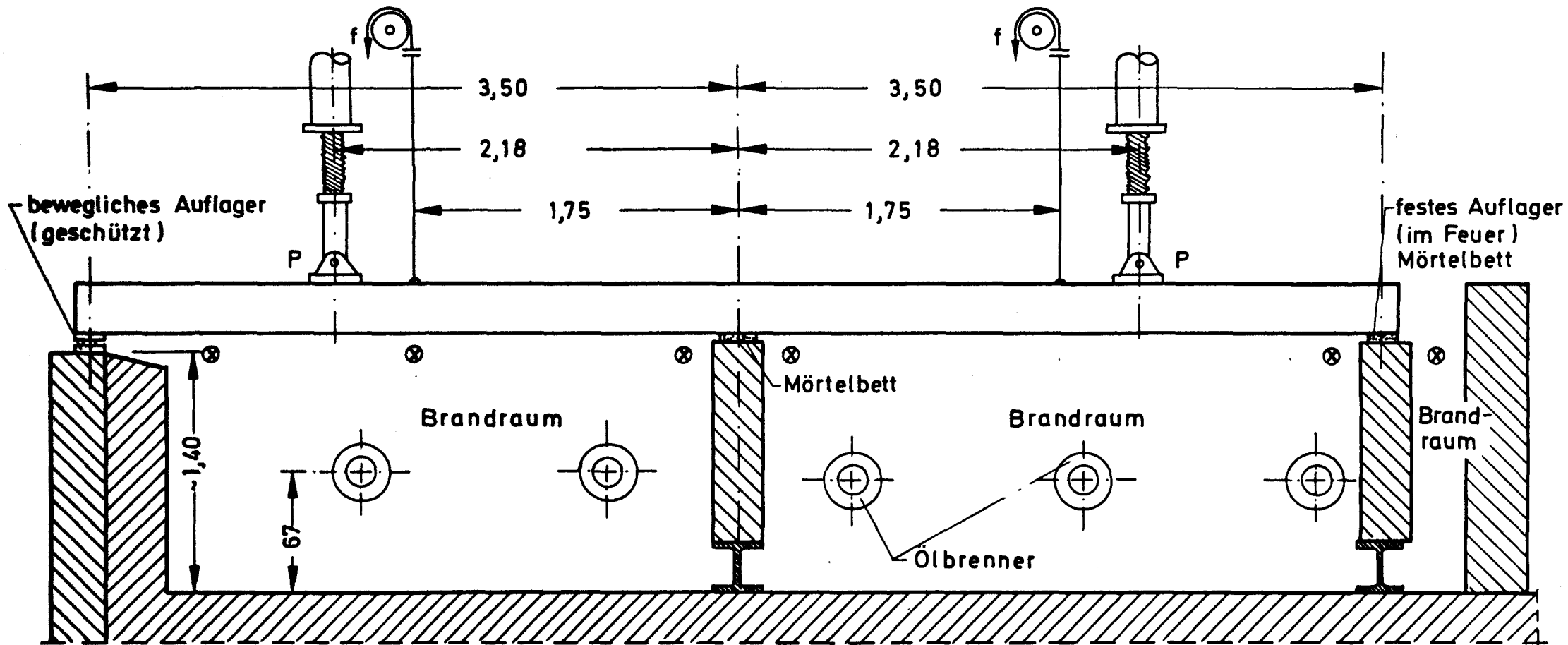
Nr.	Stck.	$\phi$	L	$\phi$ 6	$\phi$ 8	$\phi$ 10	$\phi$ 28
1	6	8	3,70		22,20		
2	2	28	3,70				7,40
3	1	10	3,70			3,70	
4	1	6	3,70	3,70			
5	31	6	0,40	12,40			
6	31	6	0,65	20,15			
m:				36,25	22,20	3,70	7,40
kg:				8,1	8,9	2,3	36,9

57 kg St 420 / 500

1 Matte K884 93 kg St 500 / 550

B 25, St 420 / 500

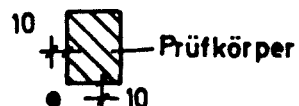
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 8
Bewehrungsplan	Anlage 13
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



⊗ Messung der Brandraumtemperatur

Brandraumabdeckung und Isolierung der Stahlteile nicht dargestellt

Lage der Meßstellen der Brandraumtemperatur

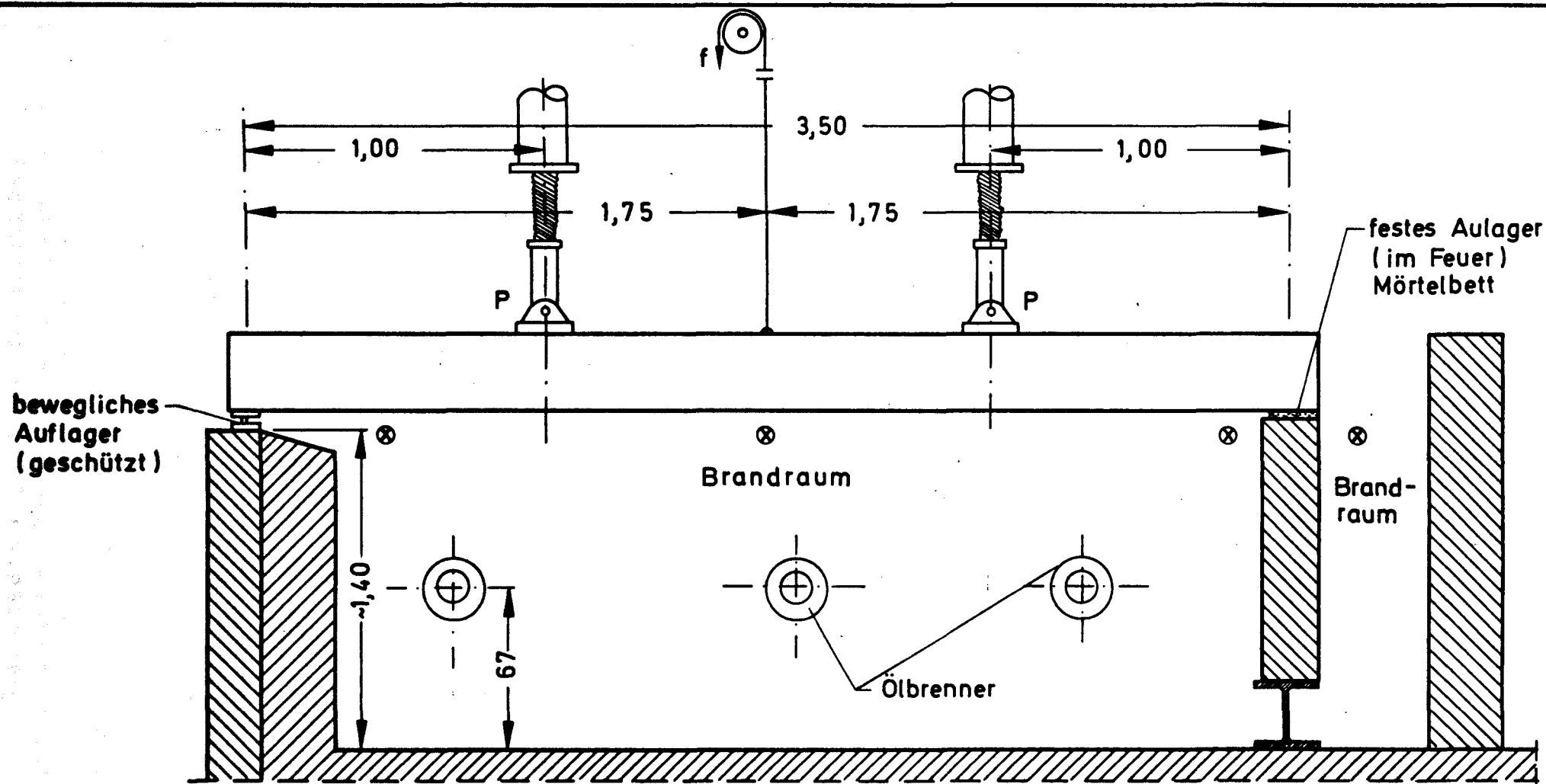


## Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV

### Prinzip des Versuchsaufbaus ; Zweifeldsystem Balken 1-7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 2.1

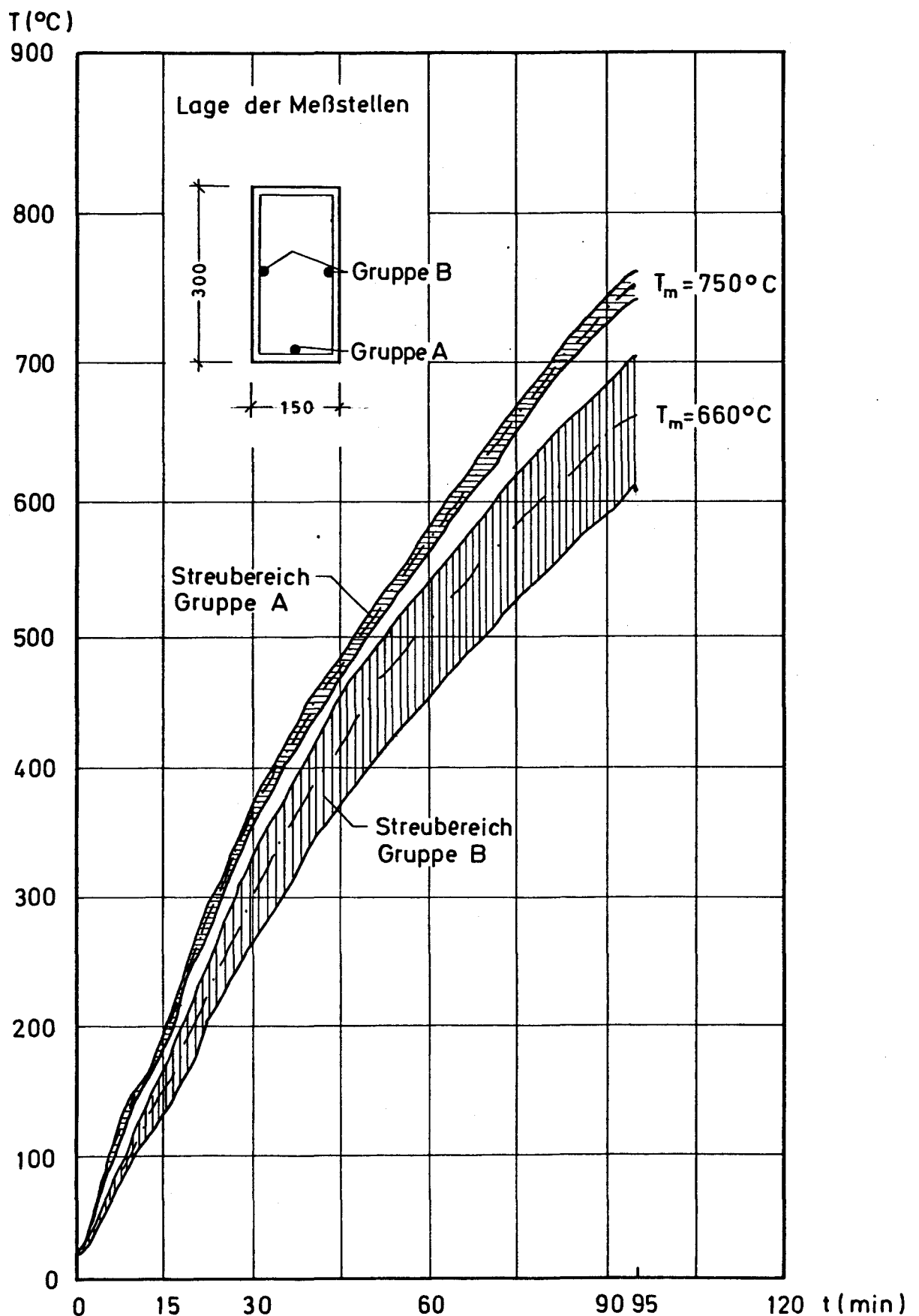


# Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV

## Prinzip des Versuchsaufbaus, Einfeldsystem Balken 8

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 2.2



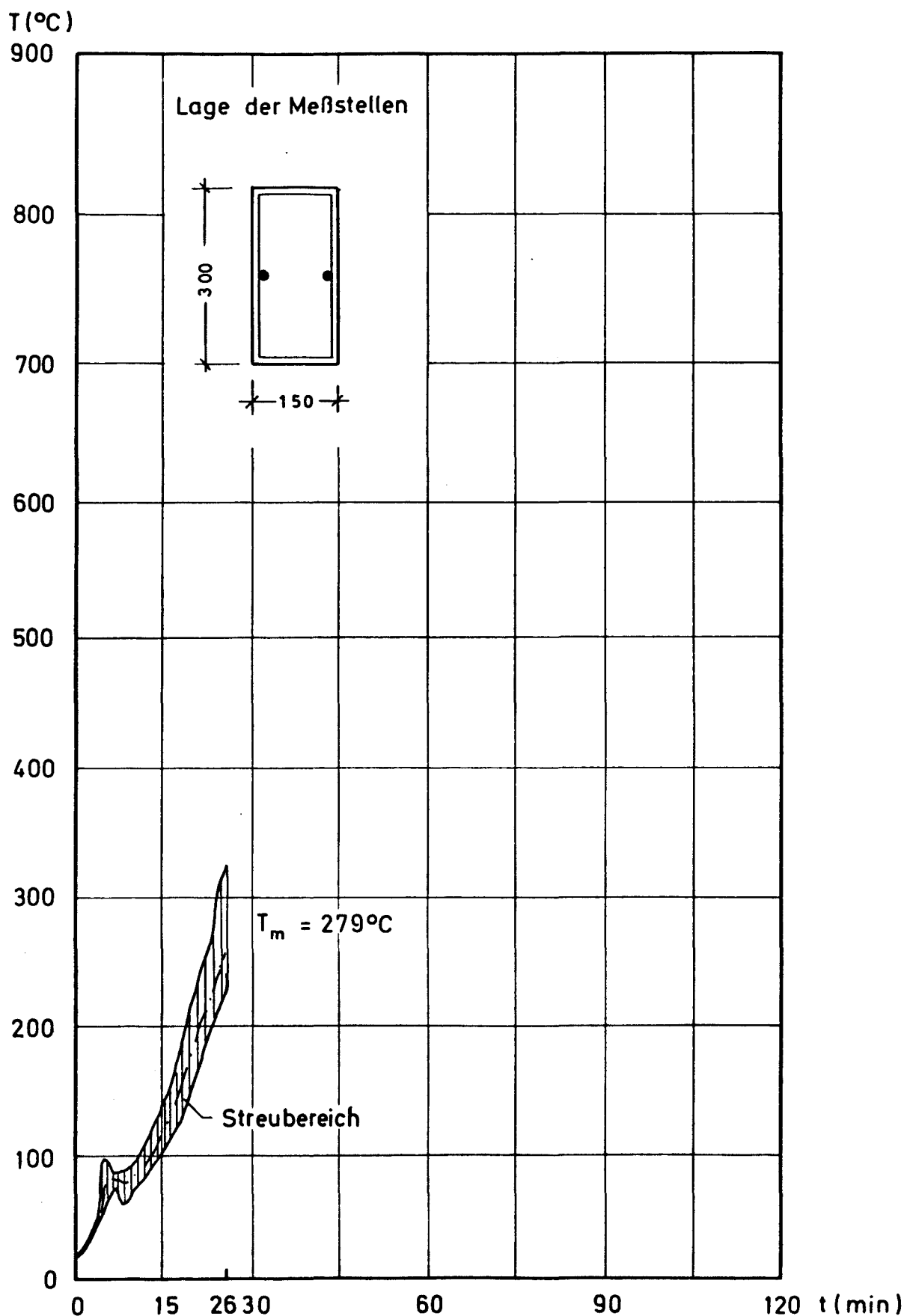
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 1

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



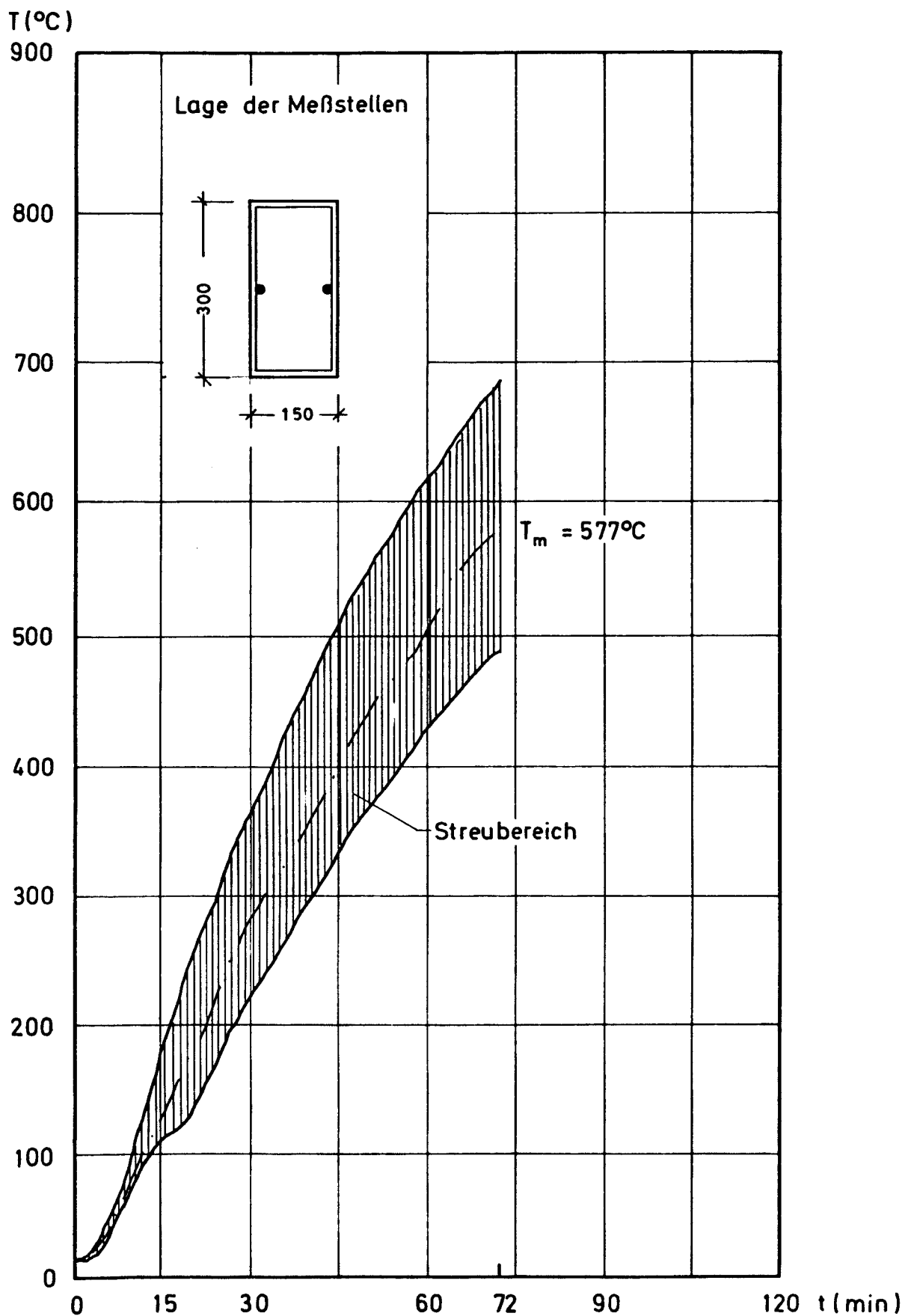
**Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV**

**Balken 2**

**Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln**

**Anlage 3.2**

**Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen**



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

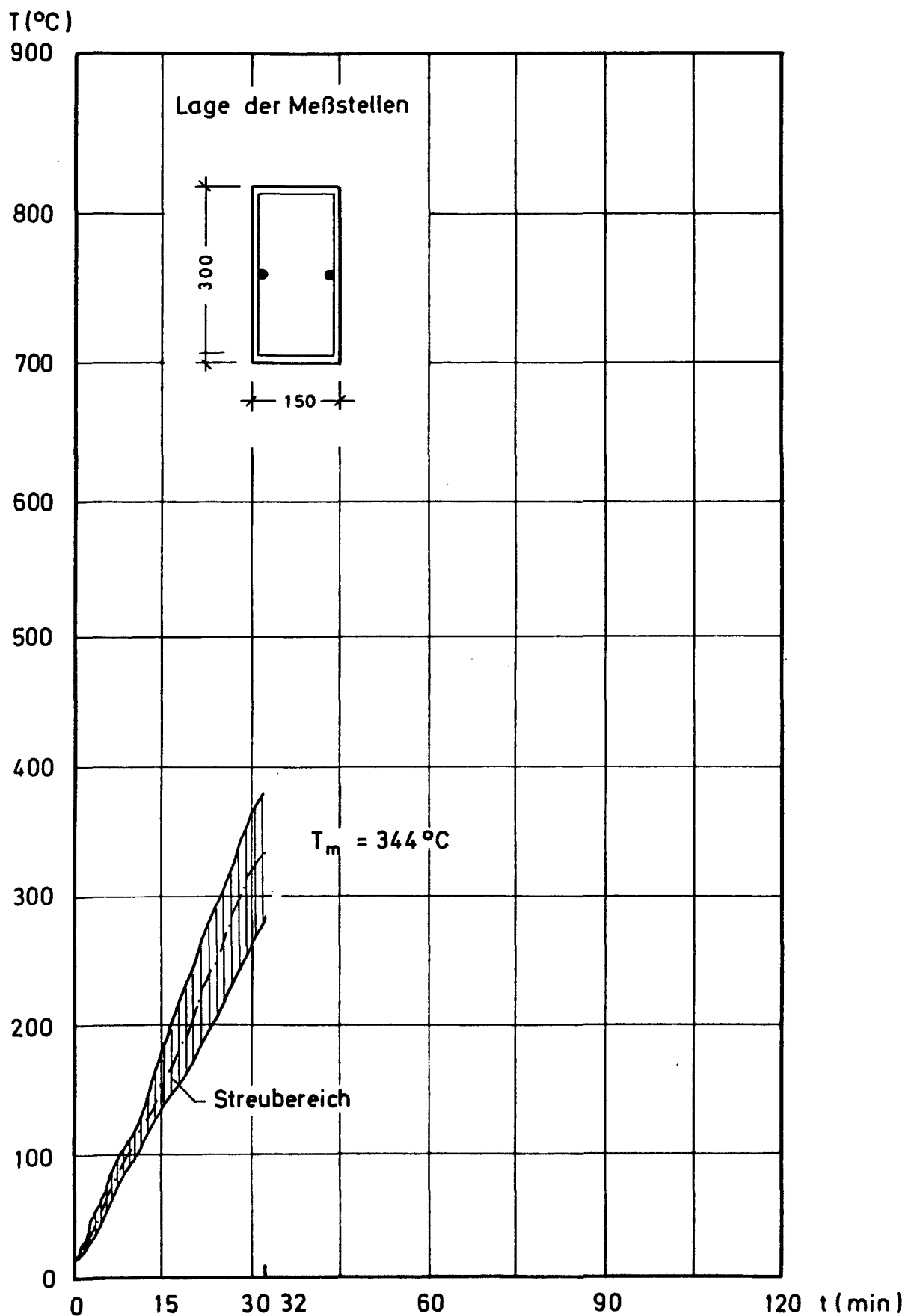
Balken 3

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





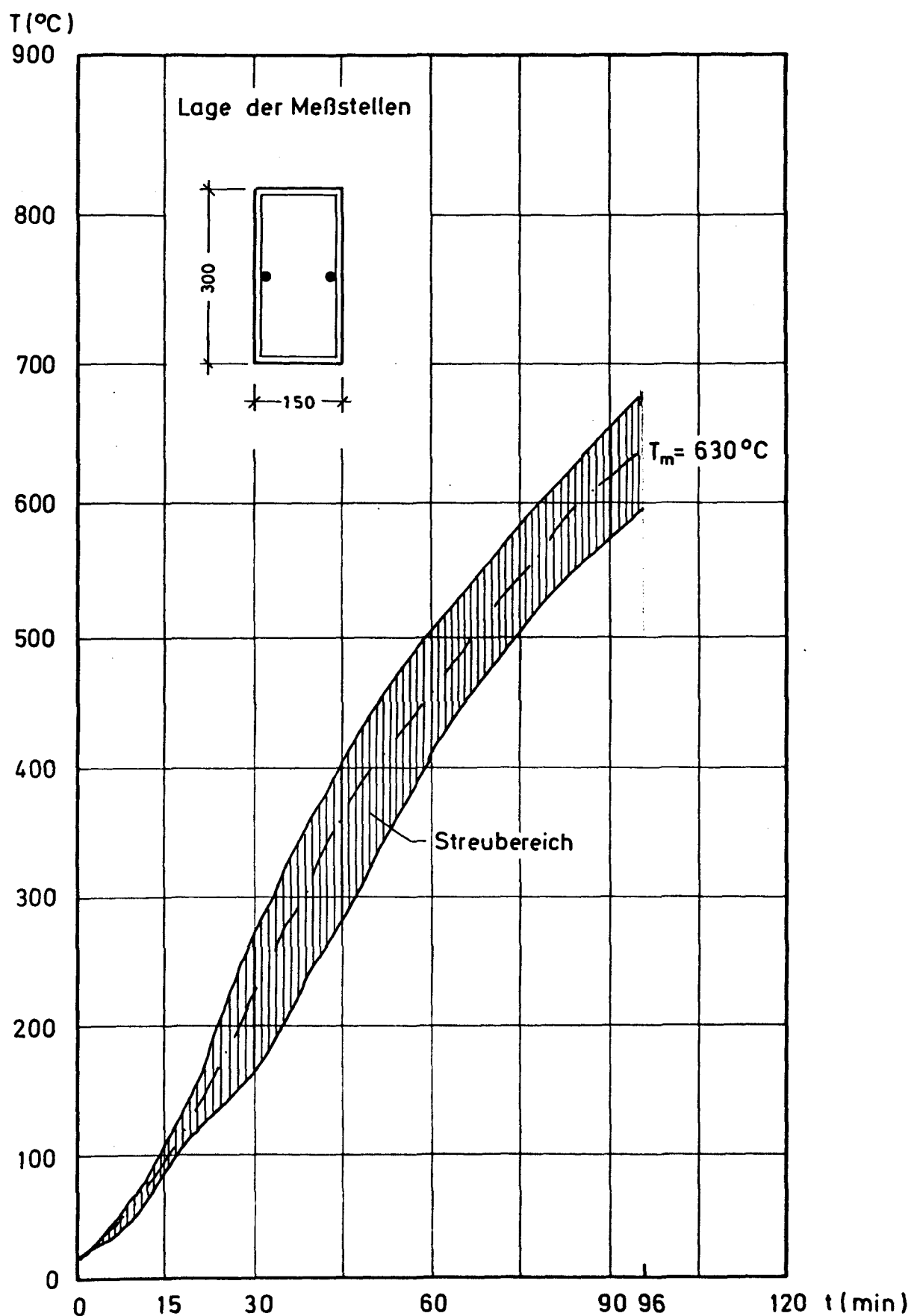
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 4

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



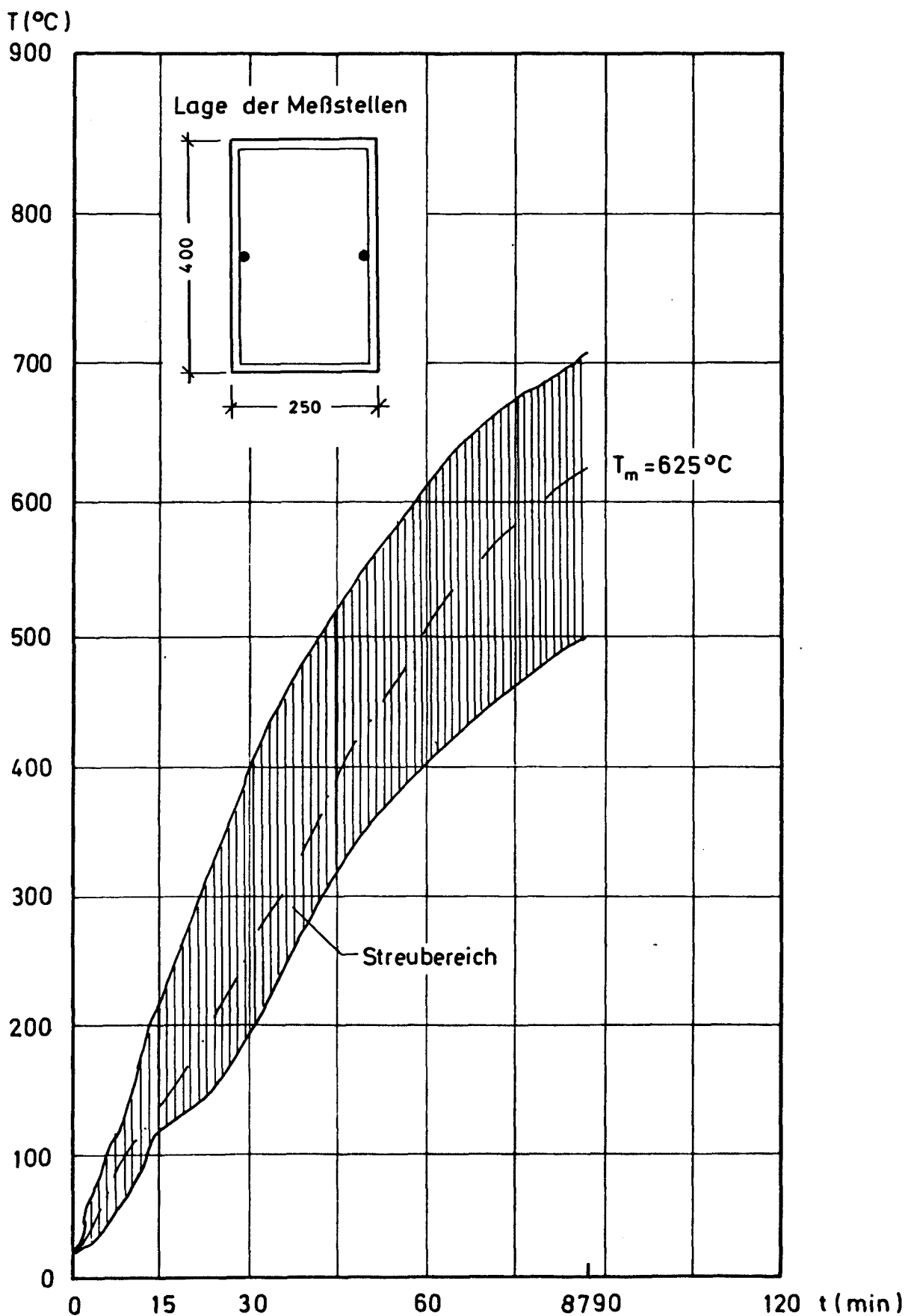
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 5

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



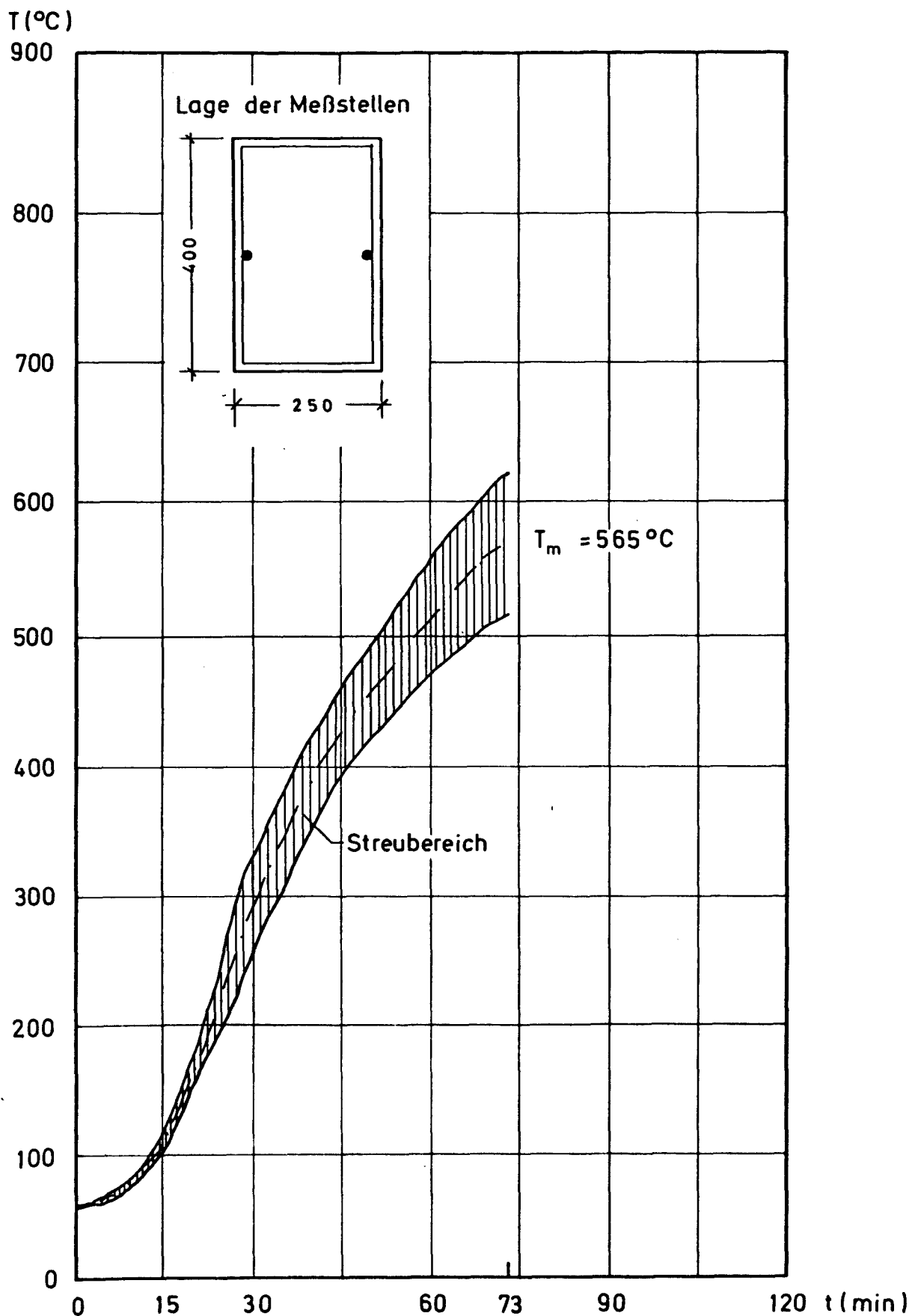
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 6

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 7

Temperaturverlauf an den Umschließungsbügeln

Anlage 3.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

T (°C)

900

800

700

600

500

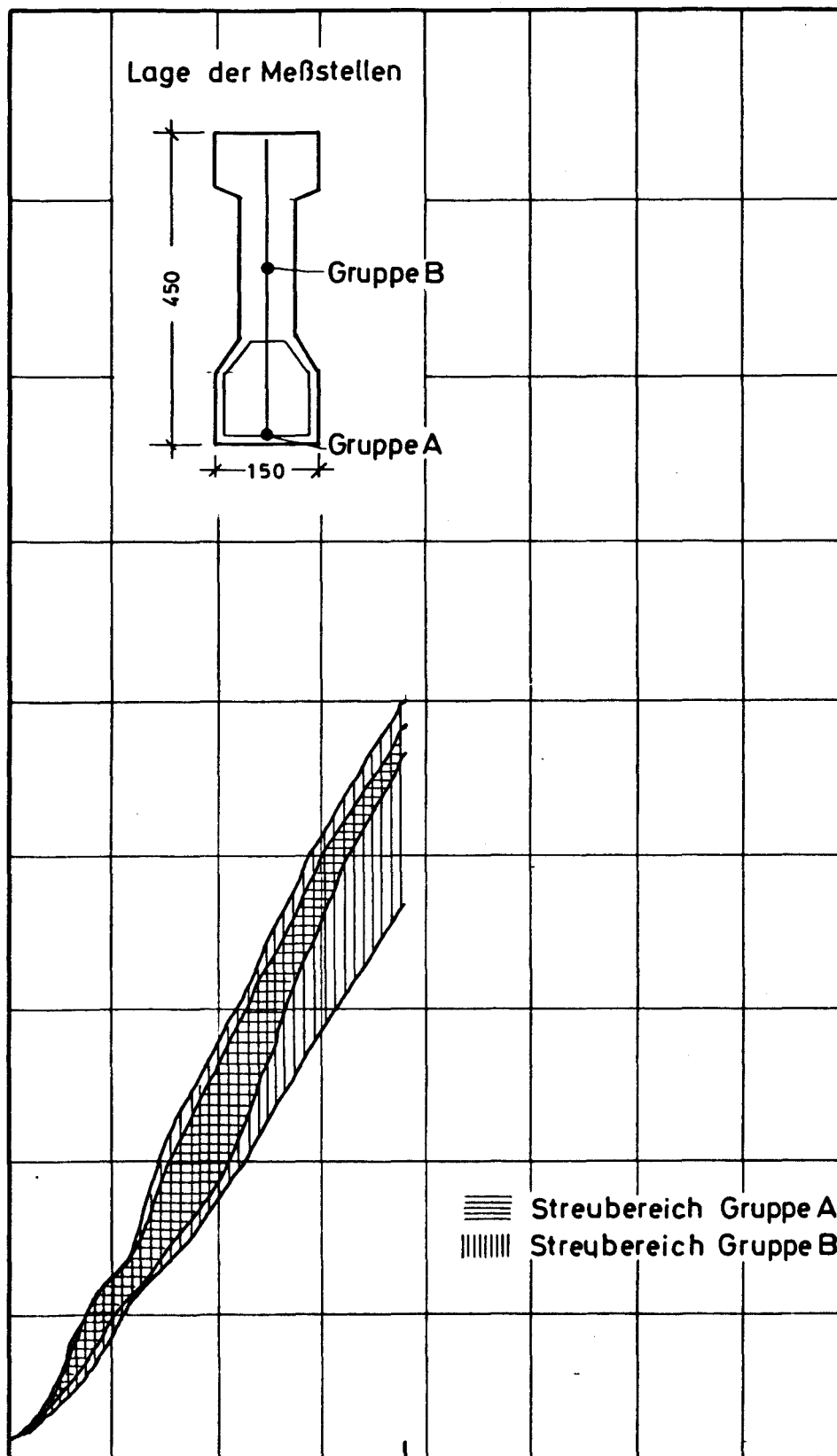
400

300

200

100

0



0

15

30

5760

90

120 t (min)

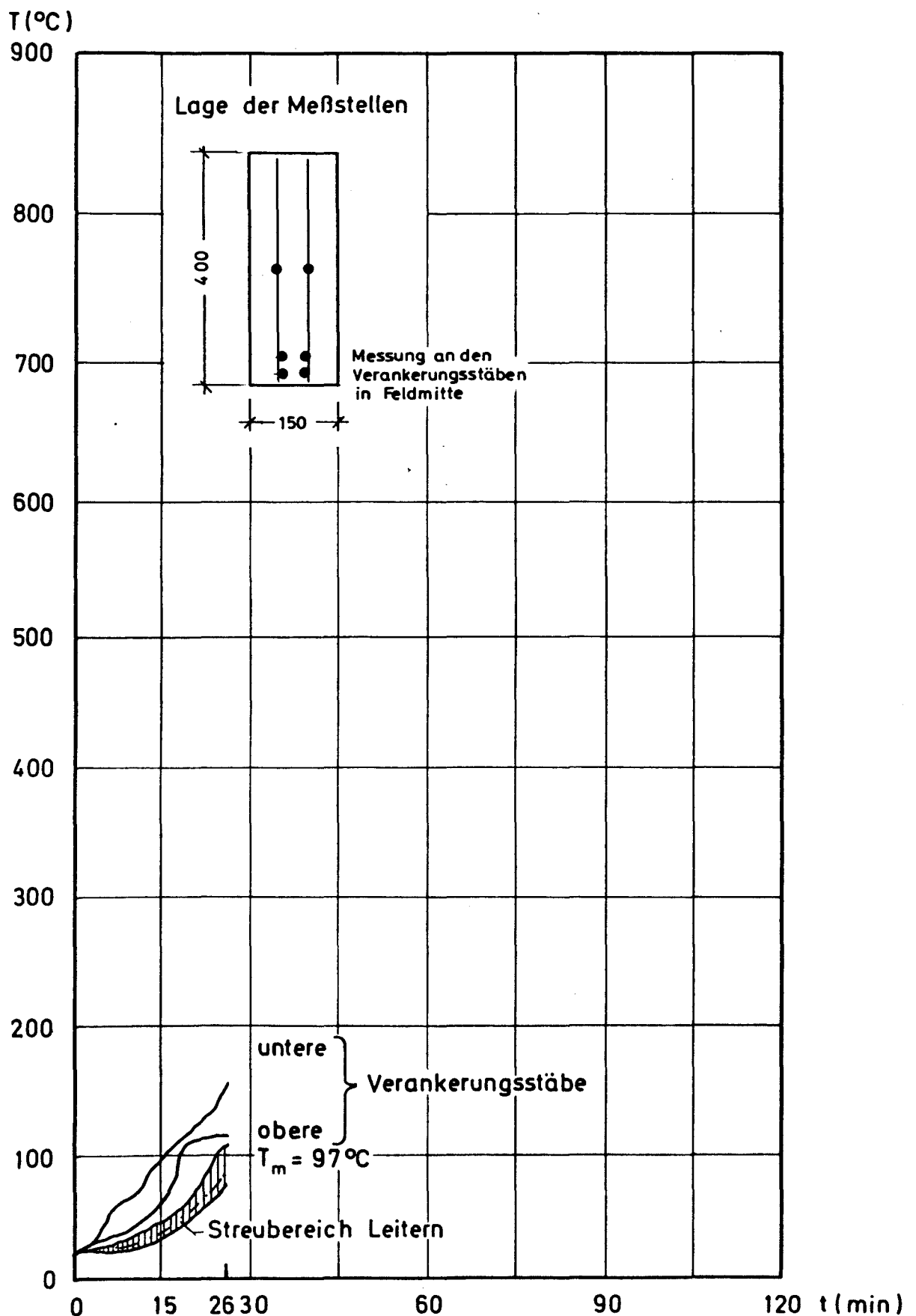
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 8

Temperaturen an den Bügeln und Schubleitern

Anlage 3.8

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

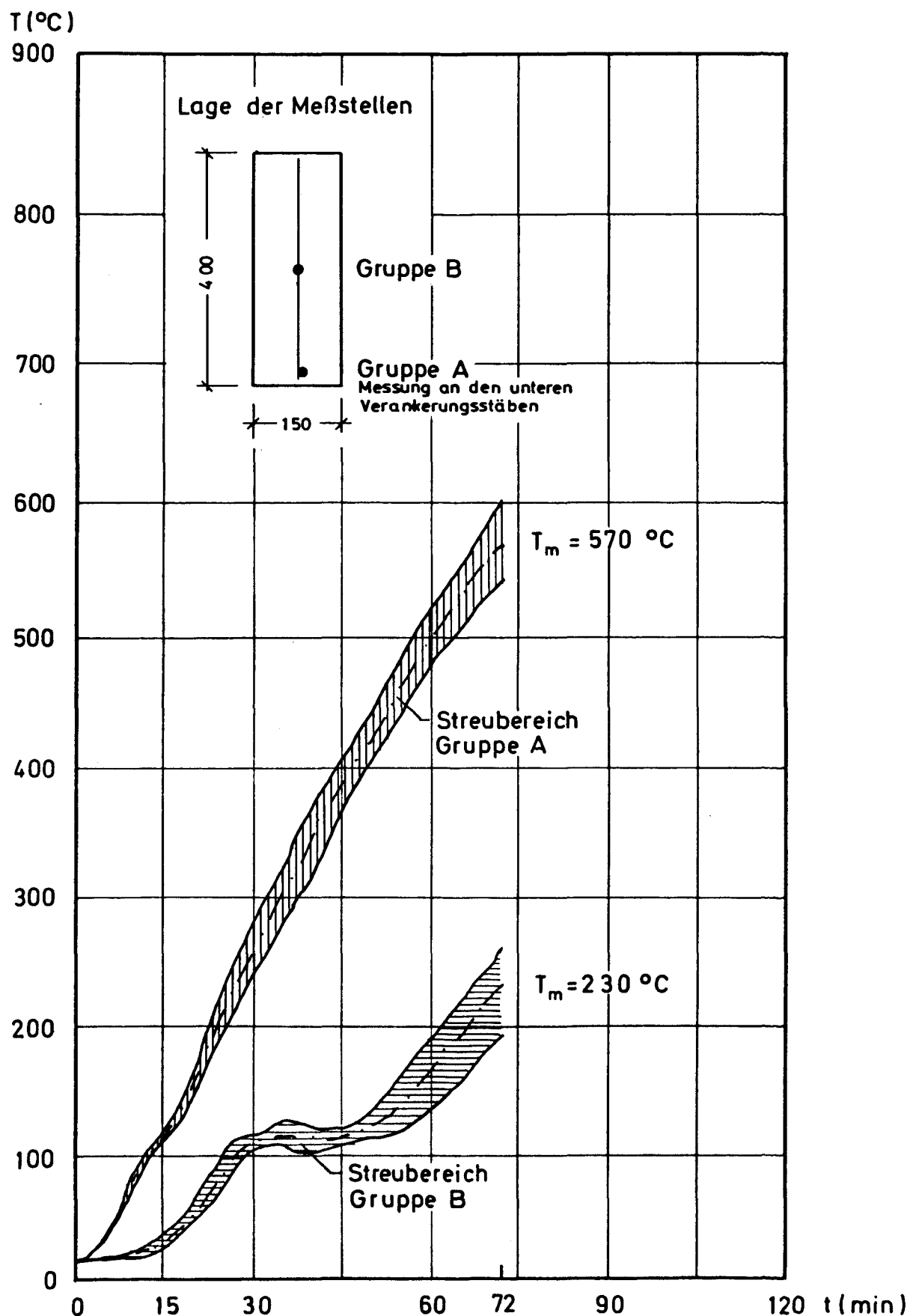
Balken 2

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





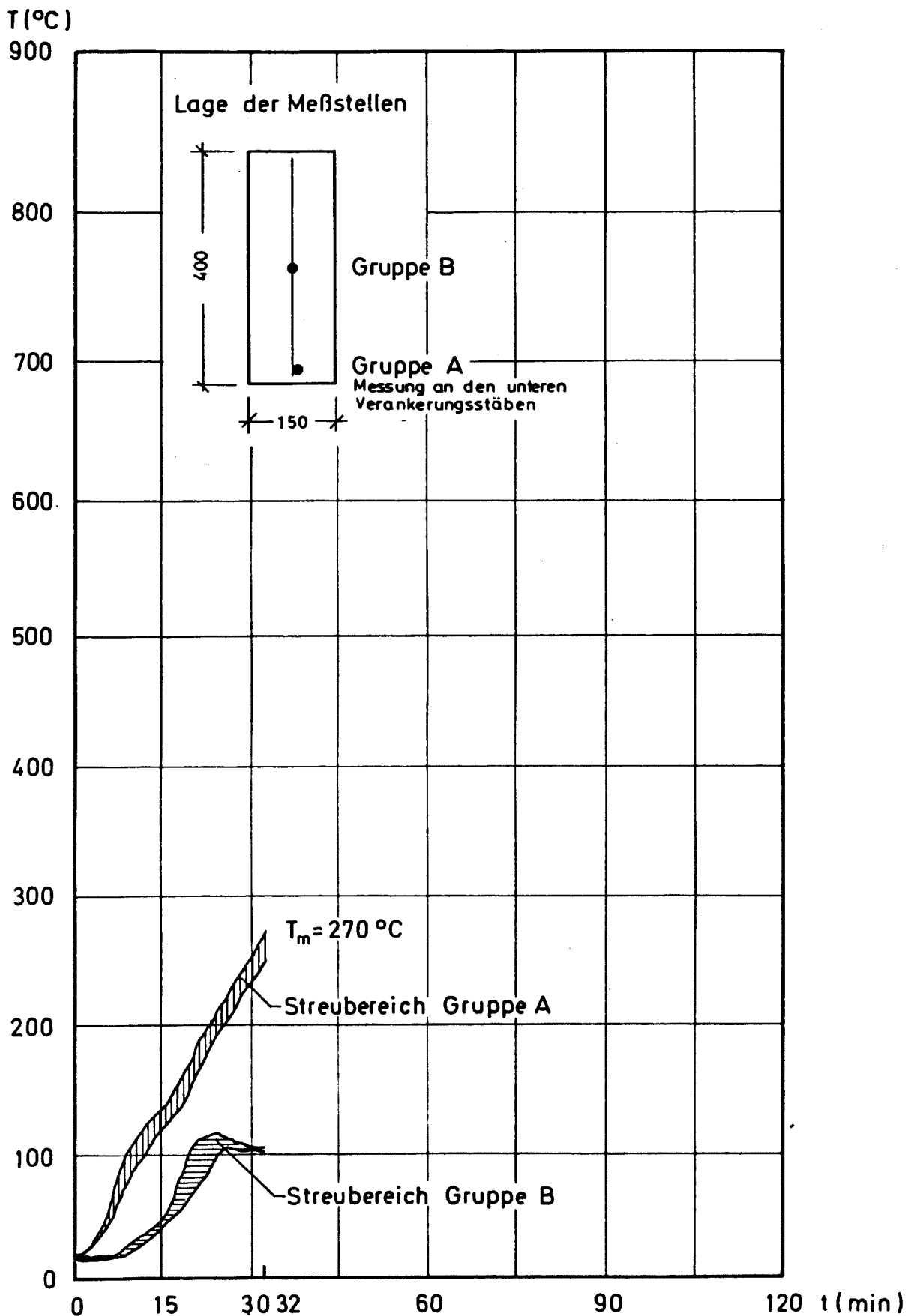
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 3

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



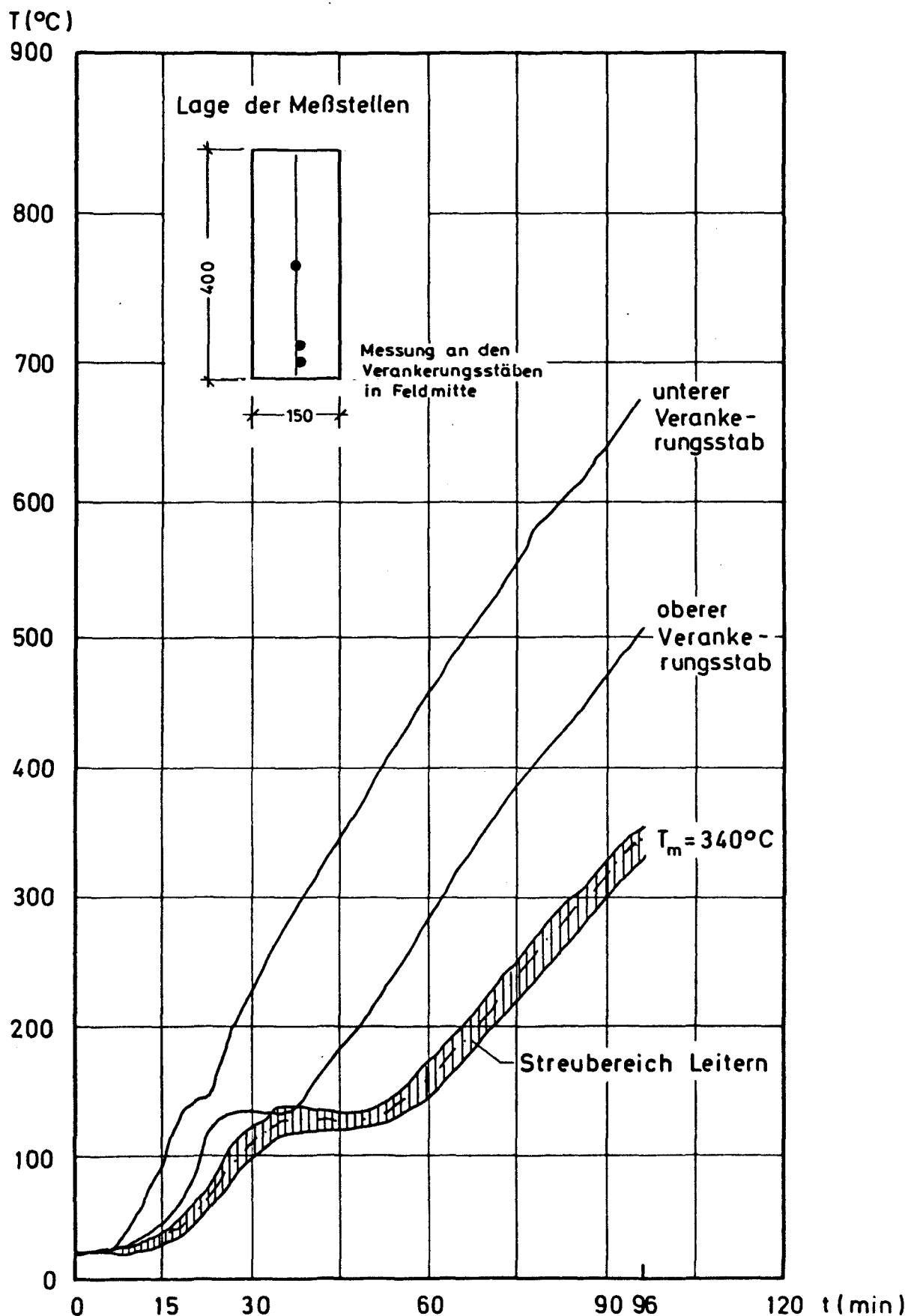
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 4

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



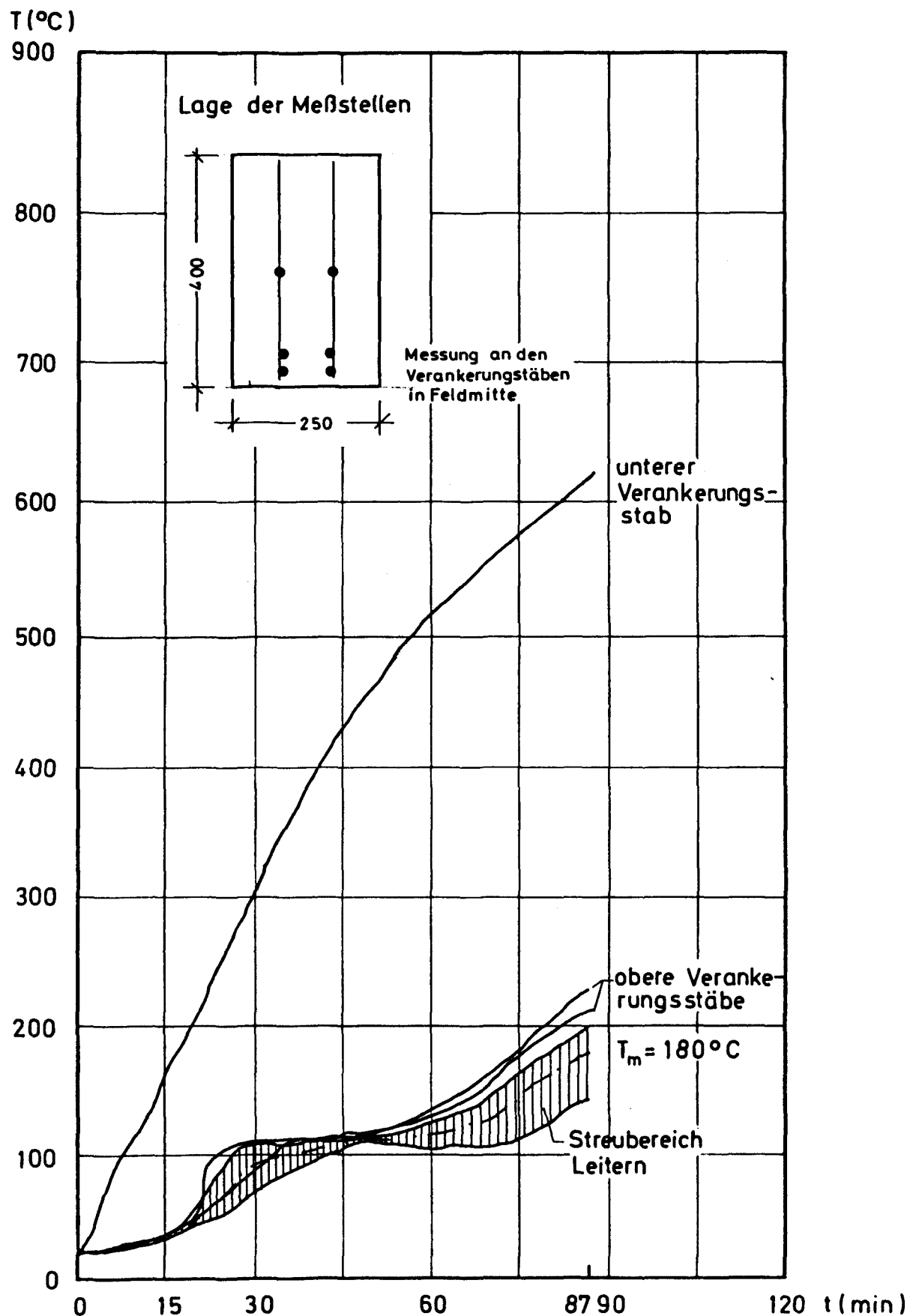
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 5

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



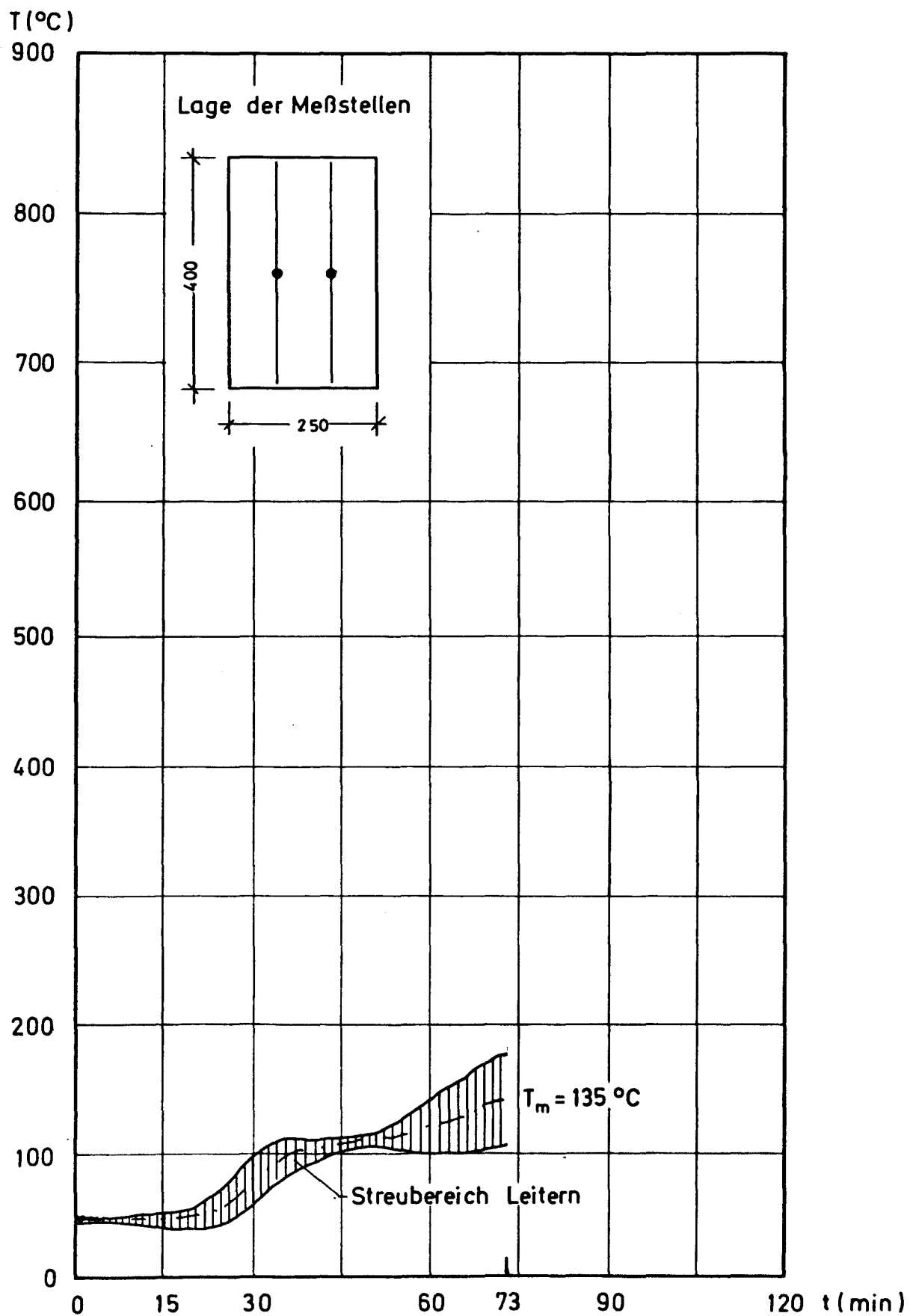
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 6

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



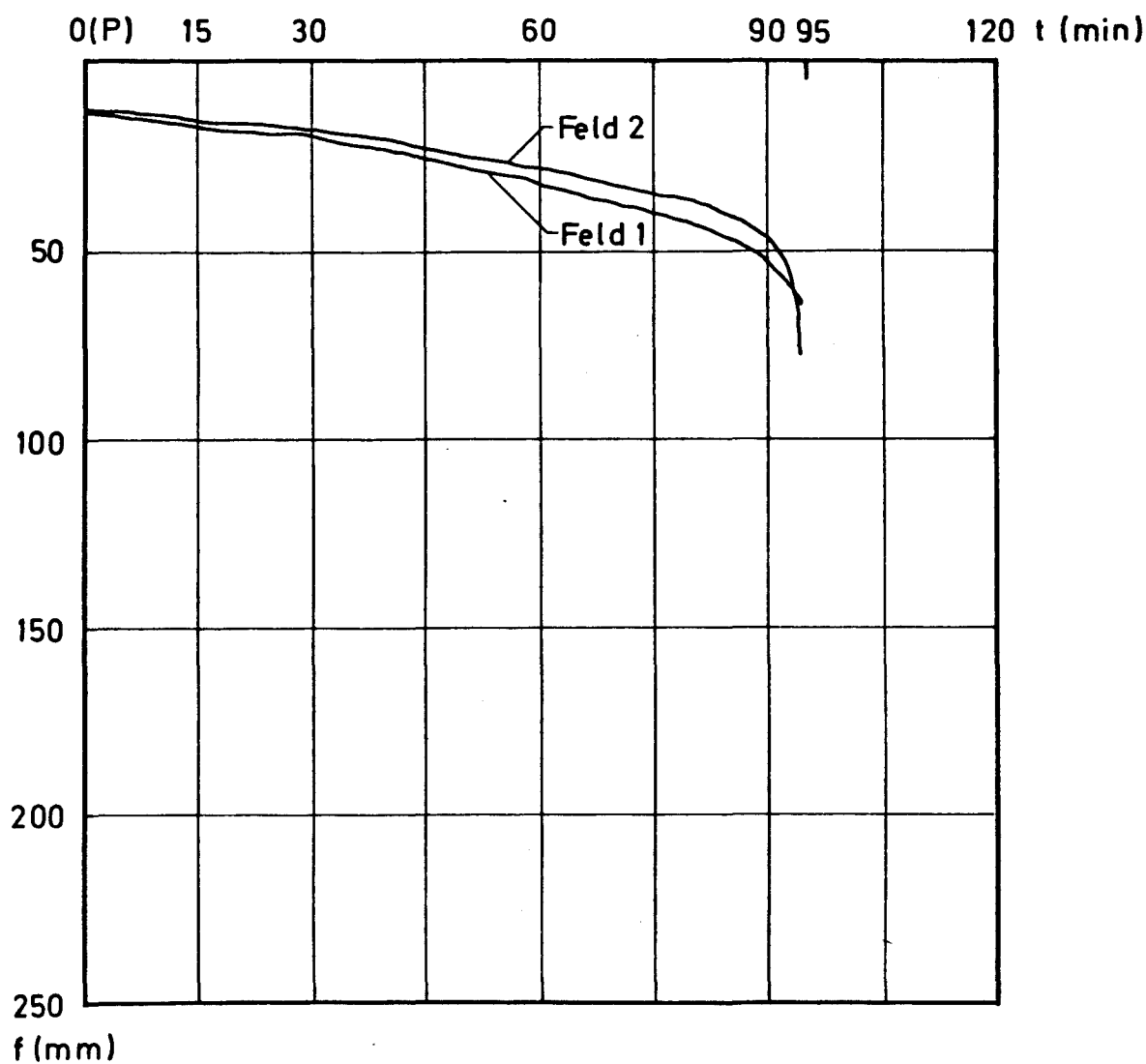
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 7

Temperaturverlauf an den Schubleitern

Anlage 4.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

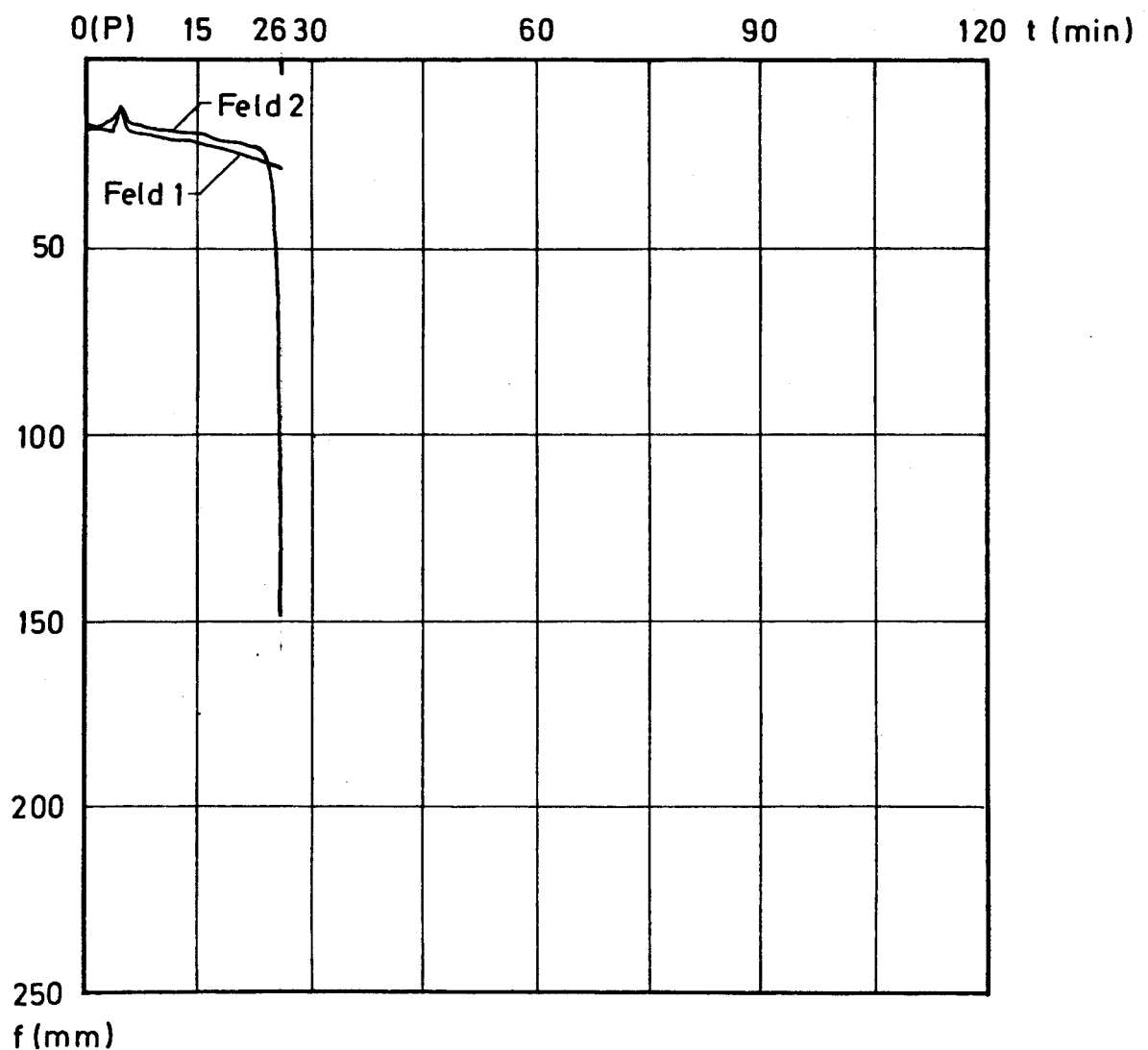
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 1

Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

Anlage 5.1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

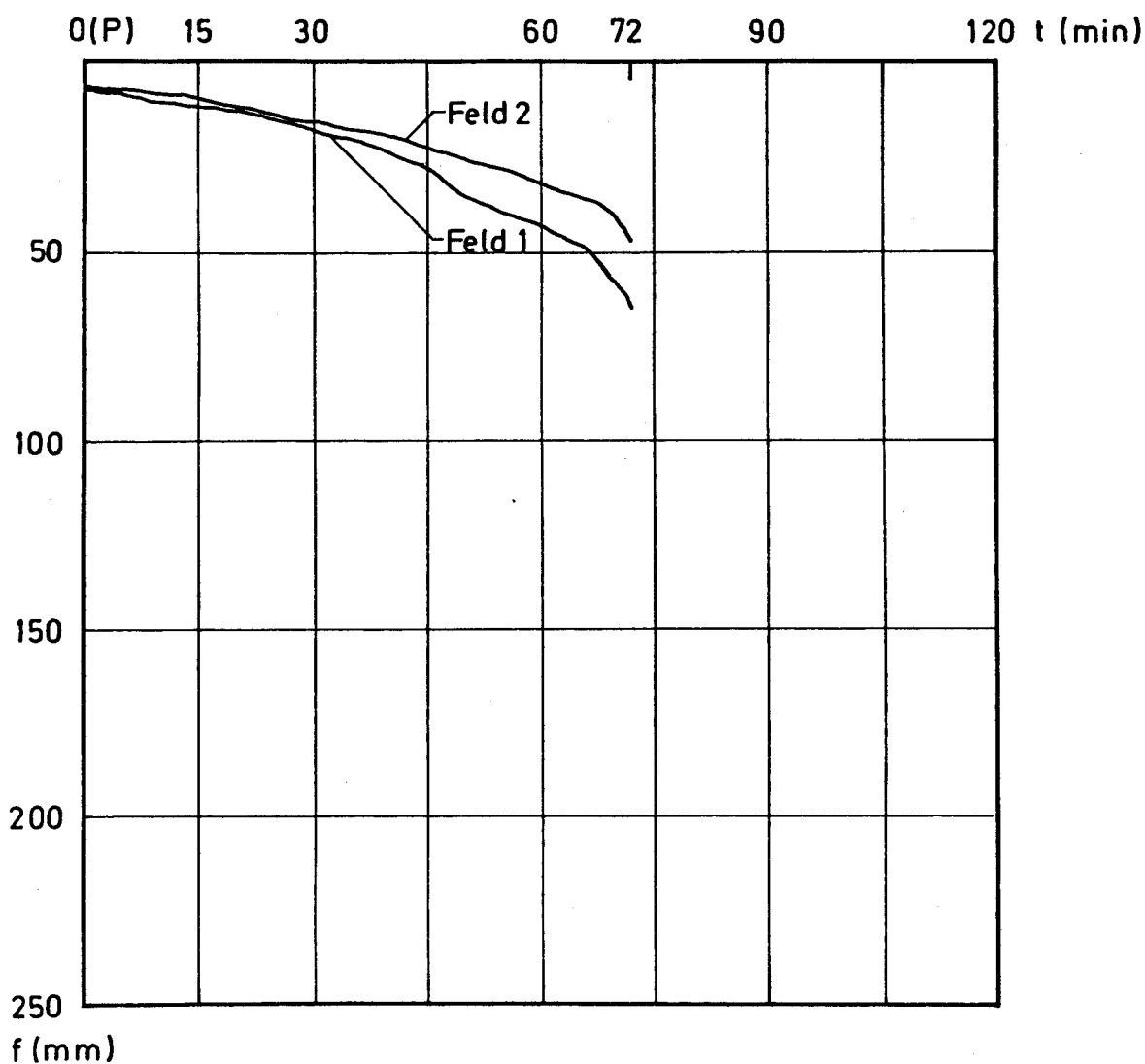
Balken 2

Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

Anlage 5.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

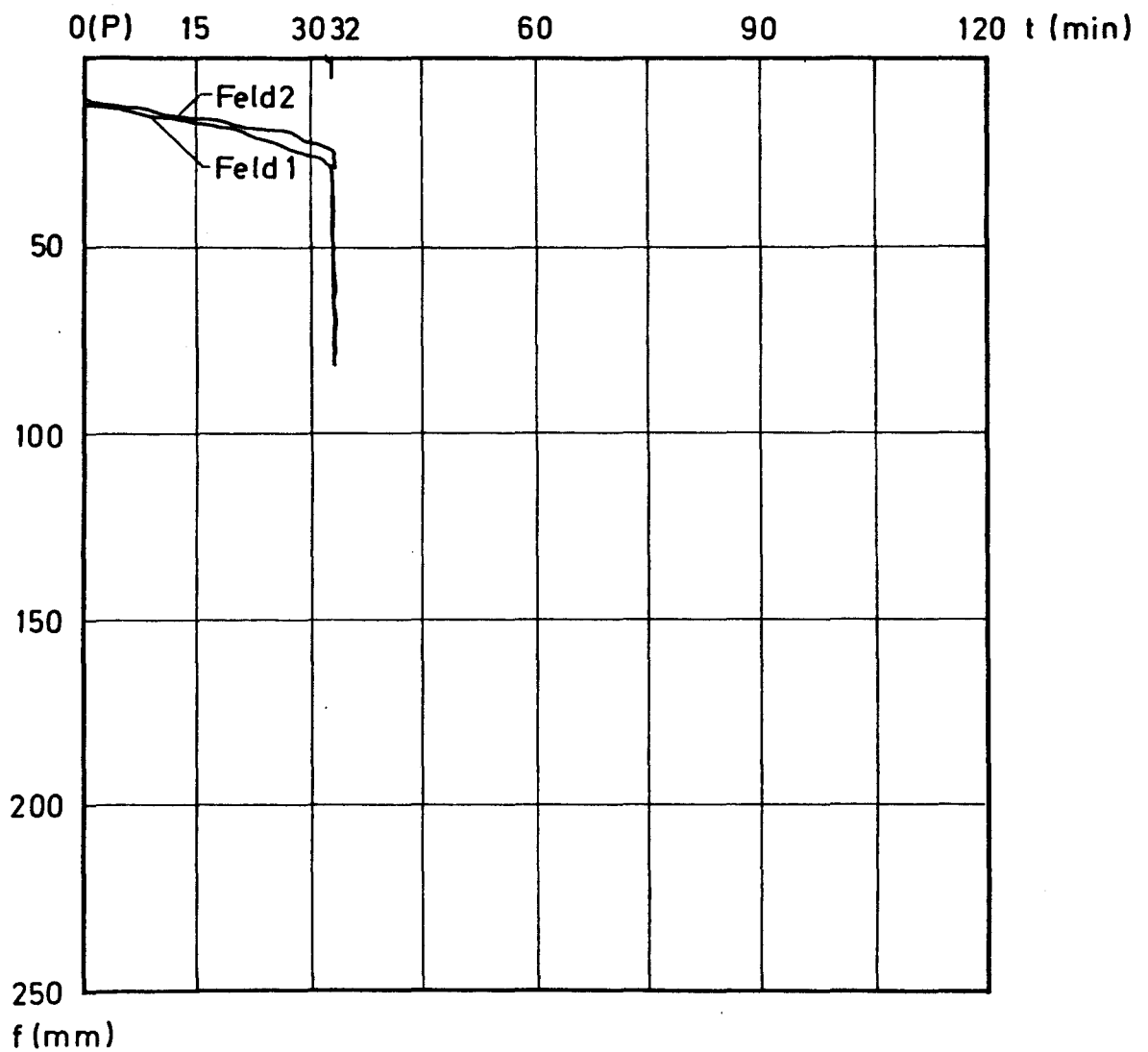
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 3

Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

Anlage 5.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

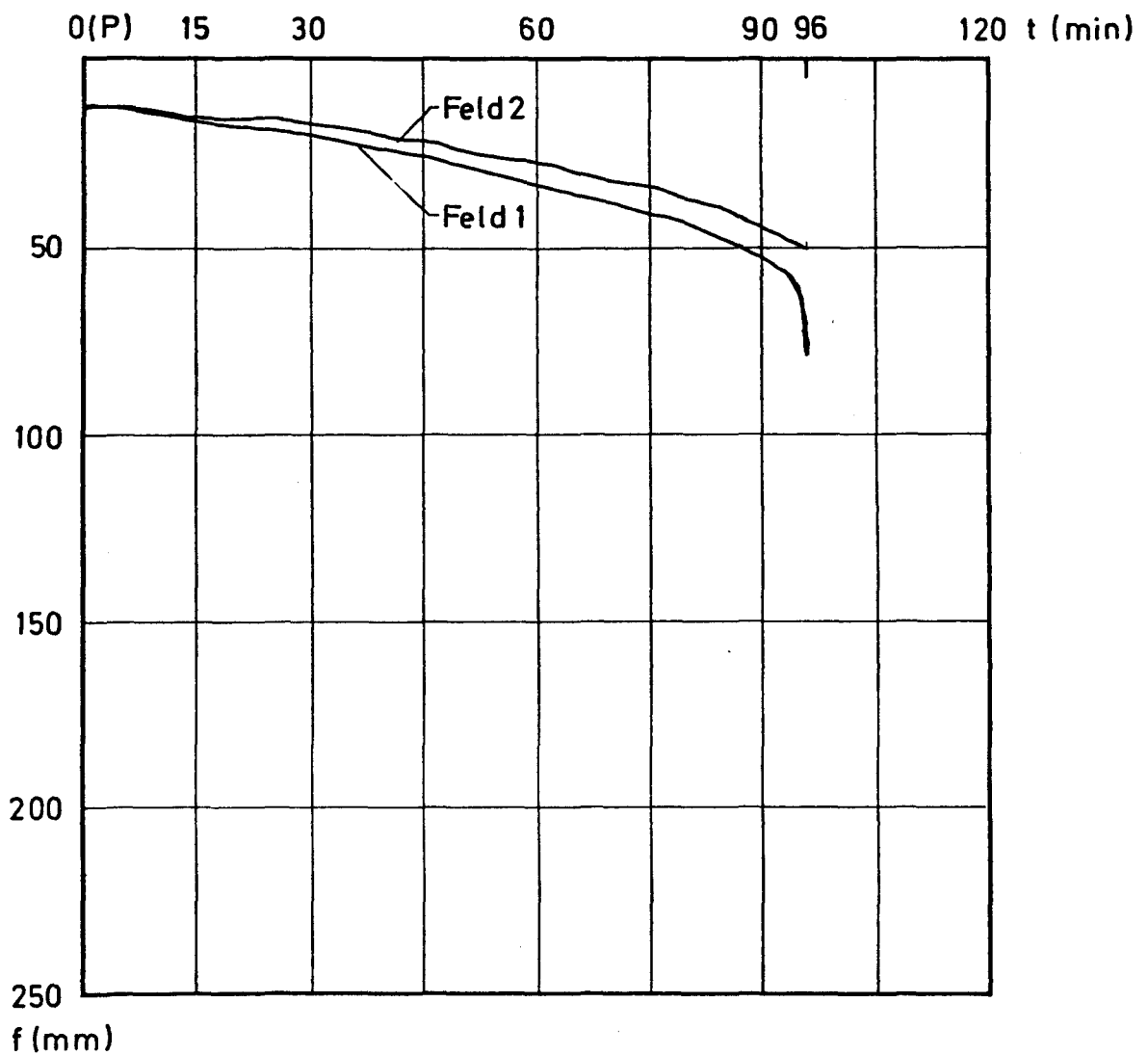
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 4

Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

Anlage 5.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g=0$  gesetzt

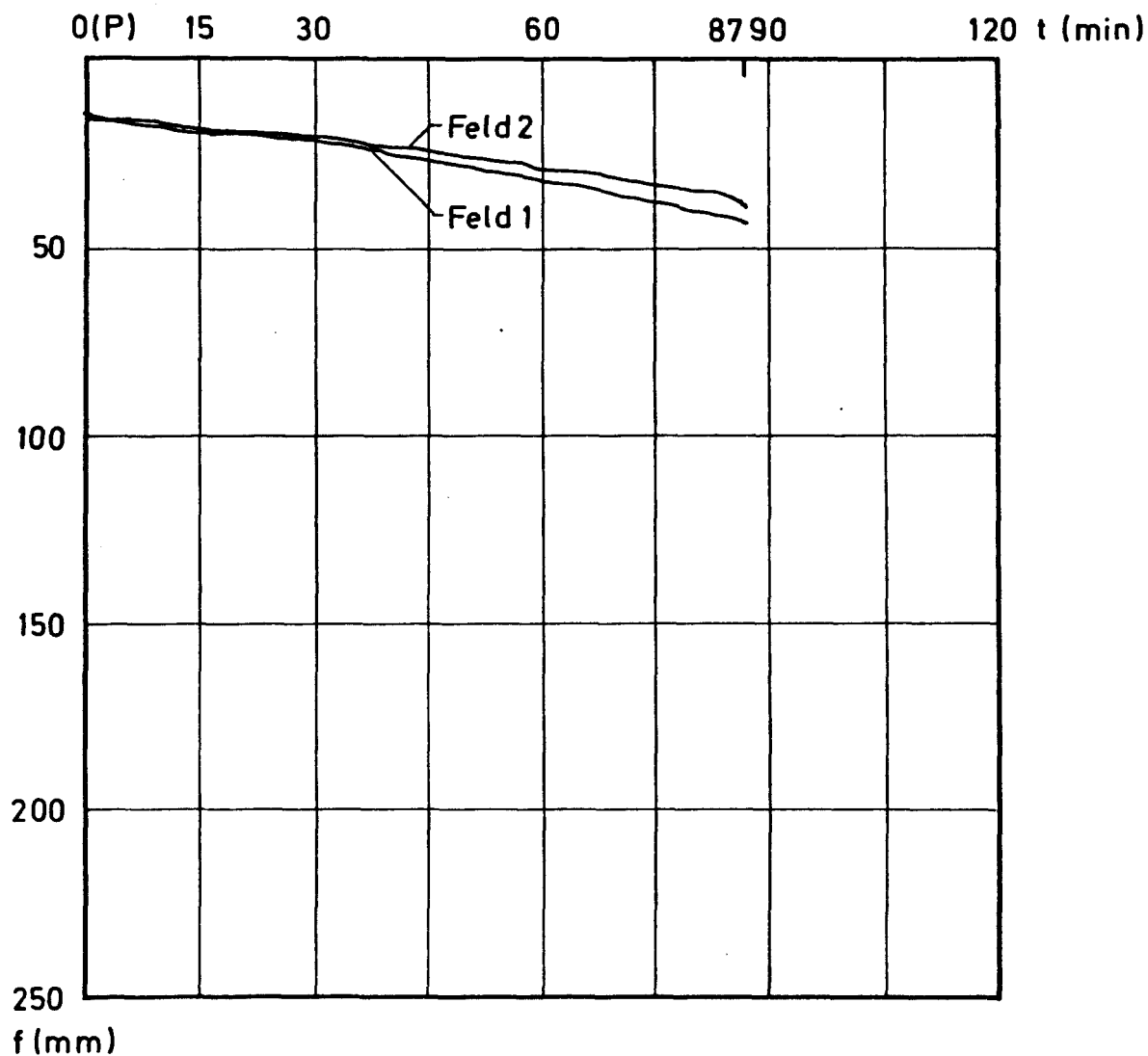
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 5

Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

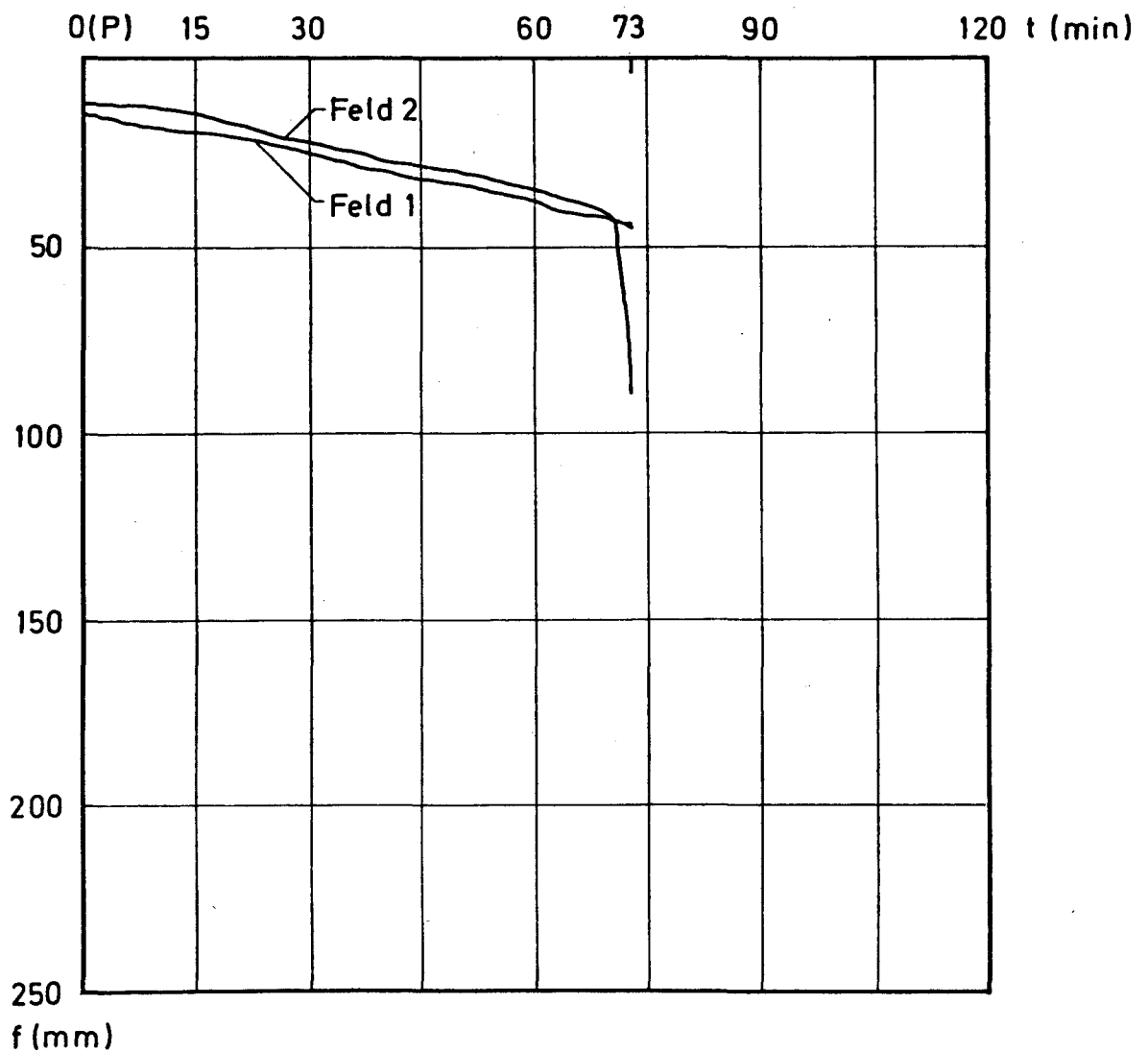
Anlage 5.5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer Teil IV	Balken 6
Durchbiegungsverlauf in Feldmitte	Anlage 5.6
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt

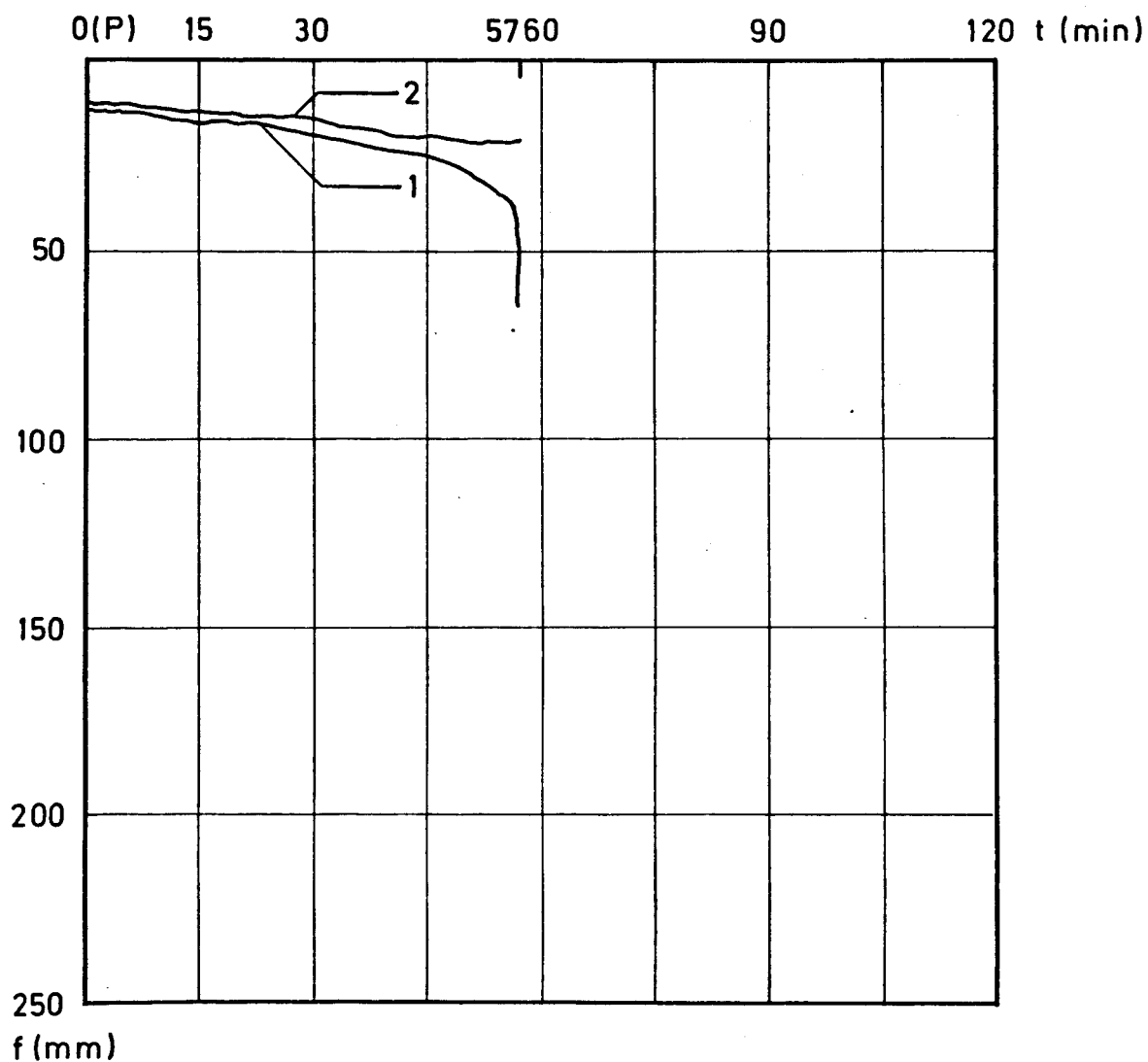
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 7

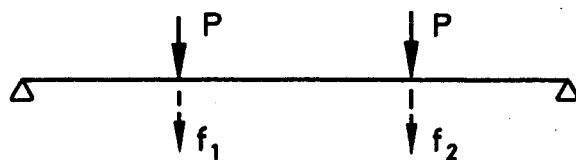
Durchbiegungsverlauf in Feldmitte

Anlage 5.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Durchbiegung unter Eigengewicht  $f_g = 0$  gesetzt



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer  
Teil IV

Balken 8

Durchbiegungsverlauf unter den Lasteintragungspunkten

Anlage 5.8

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

## Kurzfassung des Abschlußberichtes.

**Forschungsthema:** Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung; Teil IV.

**Forschende Stelle:** Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Techn. Universität Braunschweig, Beethovenstr. 52, 3300 Braunschweig

**Datum der Vergabe:** 16.08.1978

### 1. Ziel der Untersuchung.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig führte in den vergangenen Jahren im Auftrag des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Schubversagens von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung durch. Über das Verhalten von Balken, deren Schubbewehrung aus herkömmlichen Umschließungsbügeln bestand, wurde im Oktober 1979 berichtet (Teil I bis III des Untersuchungsvorhabens).

Nach DIN 1045, Ausgabe 1978, Abschnitt 18.8. ist es zulässig, einen Teil der Umschließungsbügel durch Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartige Schubbewehrungselemente, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", zu ersetzen. Das Verhalten solcher Balken unter Brandangriff war nicht aufgrund reiner Überlegungen abzuschätzen, sondern mußte experimentell überprüft werden. Zwar werden die Schubzulagen im Innern des Betonquerschnitts angeordnet und sind so relativ lange vor hohen Temperaturen geschützt, doch erfolgt die Einleitung der Schubkräfte nahe dem unteren Querschnittsrand über einen Längsstab, der in den Querschnittsbereichen liegt, die bei Brandeinwirkung frühzeitig Zerstörungen des Betongefüges zeigen, wodurch der Verbund zwischen Stahl und Beton beeinträchtigt wird. Ob die vergleichsweise guten Verbundeigenschaften gerippter Stäbe, aus welchen ja die Schubleiter hergestellt werden, trotzdem noch ausreichen, die Verankerung in der Biegezugzone bzw. im unteren Querschnittsbereich des Balkens sicherzustellen, war zu untersuchen. Die schiefen Beton-Druckstreben stützen sich gegen die Ecken der Umschließungsbügel ab. Es mußte geprüft werden, ob bei der durch die Schubleiter veränderten Konfiguration der inneren Kräfte die drastisch verringerten Umschließungsbügel, deren untere Ecken zudem extrem erwärmt und in ihrer Festigkeit gemindert werden, in der Lage sind, schräg nach außen wirkende Spreizkräfte ausreichend lange aufzunehmen.



## 2. Ergebnis der Untersuchung.

Die Forschungsarbeit wurde durchgeführt, um zu prüfen, ob Stahlbetonbalken, deren Schubbewehrung gem. DIN 1045 (1978), Abschn. 18.8.4 zu einem Teil aus Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartigen Schubbewehrungselementen, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", besteht, ausreichende Sicherheit unter Brandbeanspruchung aufweisen. Dazu wurden sieben Normbrandversuche an symmetrischen Zweifeld-Balken, entworfen nach DIN 4102 für F 90, durchgeführt, bei denen sich herausstellte, daß bei ungünstigem M/Q-Verhältnis mit verfrühtem Versagen gerechnet werden muß, wenn beim Entwurf der Balken die durch die Normen gestatteten Möglichkeiten

- hoher Schubzulagenanteil nach DIN 1045 (1978)
- geringe Balkenbreite nach DIN 4102 (Teil 4, 1980)

ausgenutzt werden. Verringerung des Schubzulagenanteils und/oder Vergrößerung der Balkenbreite verbessern das Brandverhalten, jedoch konnten noch keine Grenzen abgesteckt werden.

Es dürfte aus Gründen wirtschaftlichen Arbeitsablaufs und Materialeinsatzes nicht im Interesse der Praxis sein, den zulässigen Anteil der Schubzulagen gegenüber den Umschließungsbügeln zu verkleinern, die Angabe einer erforderlichen Mindest-Balkenbreite würde dagegen keine empfindliche Einschränkung der Möglichkeiten bedeuten, da die Anordnung von Schubzulagen ohnehin erst bei Balken gewisser Breite interessant ist (bei schmalen Balken behindern Schubzulagen den Betoniervorgang beträchtlich).

Aufgrund der hier und in Teil I-III der Forschungsaufgabe gewonnenen Erkenntnisse werden folgende Empfehlungen gegeben:

Für die Feuerwiderstandsklassen F 30 und F 60 bestehen gegen die Verwendung von leiterartigen Schubzulagen in Balken von mindestens 250 mm Breite keine Bedenken.

Für Balken der Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 werden in DIN 4102 Teil 4 (1980) mindestens vierschnittige Bügel gefordert. Es besteht u.E. kein dringendes Bedürfnis, diese Forderung etwa bei besonders breiten Balken zu lockern, bei denen auch unter Verwendung von Schubzulagen ein ausreichendes Brandverhalten nicht ausgeschlossen sein dürfte. Die Forderung so hoher Feuerwiderstandsklassen wird so selten gestellt, daß die derzeitigen Auflagen hinsichtlich der Schubbewehrung solcher Balken auch in wirtschaftlicher Hinsicht vertretbar sind.

Es werden jedoch Ergänzungsversuche für die wichtigste Feuerwiderstandsklasse F 90 dringend benötigt. Zunächst sollte mit der Praxis abgestimmt werden, von welcher Balkenbreite an das Konstruieren mit Schubzulagen sinnvoll und wirtschaftlich ist. Mit einer so gefundenen Mindestbalkenbreite wären dann Balken zu konzipieren und im Normbrandversuch zu testen, bei denen jeweils der größtmögliche Anteil der Schubbewehrung aus Schubzulagen besteht, und zwar müßten dann nicht nur leiterartige Elemente, wie sie bisher ausschließlich verwendet wurden, sondern auch korb- und girlandenartige Schubzulagen untersucht werden.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wird zu gegebener Zeit einen entsprechenden Finanzierungsantrag an das Ministerium für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen stellen.

Ein weiterer Versuchskörper, Balken 8, diente zur Untersuchung, ob bei I-Balken, deren Steg keine Umschließungsbügel, sondern nur eine einschnittige Schubzulage aufweist, ausreichendes Schubverhalten unter Brandbeanspruchung gegeben ist. Da für eine solche Ausbildung nach DIN 1045, Abschnitt 18.8.4 die obere Begrenzung mit  $t = 80$  mm festgelegt ist, nach DIN 4102 Teil 4 (1980) für die geringste Feuerwiderstandsklasse F 30 eine Mindeststegbreite  $t = 80$  gefordert wird, war im Rahmen dieser Forschungsarbeit nur diese eine Stegbreite zu untersuchen. Es ergab sich im Normbrandversuch eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit, und es ist nicht erforderlich, bei so konstruierten I-Balken Einschränkungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit im Sinne von DIN 4102 zu formulieren.

### **3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen.**

#### **3.1 Welche Empfehlungen können für die weitere Normungsarbeit bzw. hinsichtlich Ergänzung oder Änderung bestehender Normen, Richtlinien und dgl. gegeben werden ?**

Nach Durchführung einiger ergänzender Untersuchungen (s.2) können Empfehlungen für die Aufnahme von Balken, deren Schubbewehrung aus Bügeln und Schubzulagen besteht, in den Katalog der DIN 4102 Teil 4 gegeben werden.

#### **3.2 Erscheinen weitere Arbeiten zur Abklärung offengebliebener Fragen, die mit den durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang stehen, erforderlich und welche Arbeiten sind besonders vorrangig ?**

Für Balken, die der Feuerwiderstandsklasse F 90 gemäß DIN 4102 Teil 2 genügen sollen, sind Ergänzungsversuche, die vorher mit der Praxis abzustimmen sind (s.2), notwendig.

#### **3.3 Welche Folgerungen können für die Baupraxis aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden; hierbei ist auf bestehende Richtlinien besonders Rücksicht zu nehmen ?**

Bei Stahlbetonbalken mit ungünstigem Momenten-Schub-Verhältnis ist keine ausreichende Schubsicherheit unter Brandbeanspruchung gegeben, wenn die durch die einschlägigen Normen gestatteten Möglichkeiten

- hoher Schubzulagenanteil nach DIN 1045 (1978)
  - geringe Balkenbreite nach DIN 4102 Teil 4 (1980)
- bei der Konstruktion ausgenutzt werden.

## Kurzfassung des Abschlußberichtes.

**Forschungsthema:** Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung;  
Teil IV.

### BIBLIOTHEK

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

**Forschende Stelle:** Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Techn. Universität Braunschweig, Beethovenstr. 52, 3300 Braunschweig

**Datum der Vergabe:** 16.08.1978

## 1. Ziel der Untersuchung.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig führte in den vergangenen Jahren im Auftrag des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Schubversagens von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung durch. Über das Verhalten von Balken, deren Schubbewehrung aus herkömmlichen Umschließungsbügeln bestand, wurde im Oktober 1979 berichtet (Teil I bis III des Untersuchungsvorhabens).

Nach DIN 1045, Ausgabe 1978, Abschnitt 18.8. ist es zulässig, einen Teil der Umschließungsbügel durch Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartige Schubbewehrungselemente, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", zu ersetzen. Das Verhalten solcher Balken unter Brandangriff war nicht aufgrund reiner Überlegungen abzuschätzen, sondern mußte experimentell überprüft werden. Zwar werden die Schubzulagen im Innern des Betonquerschnitts angeordnet und sind so relativ lange vor hohen Temperaturen geschützt, doch erfolgt die Einleitung der Schubkräfte nahe dem unteren Querschnittsrand über einen Längsstab, der in den Querschnittsbereichen liegt, die bei Brandeinwirkung frühzeitig Zerstörungen des Betongefüges zeigen, wodurch der Verbund zwischen Stahl und Beton beeinträchtigt wird. Ob die vergleichsweise guten Verbundeigenschaften gerippter Stäbe, aus welchen ja die Schubleitern hergestellt werden, trotzdem noch ausreichen, die Verankerung in der Biegezugzone bzw. im unteren Querschnittsbereich des Balkens sicherzustellen, war zu untersuchen. Die schiefen Beton-Druckstreben stützen sich gegen die Ecken der Umschließungsbügel ab. Es mußte geprüft werden, ob bei der durch die Schubleitern veränderten Konfiguration der inneren Kräfte die drastisch verringerten Umschließungsbügel, deren untere Ecken zudem extrem erwärmt und in ihrer Festigkeit gemindert werden, in der Lage sind, schräg nach außen wirkende Spreizkräfte ausreichend lange aufzunehmen.

## 2. Ergebnis der Untersuchung.

Die Forschungsarbeit wurde durchgeführt, um zu prüfen, ob Stahlbetonbalken, deren Schubbewehrung gem. DIN 1045 (1978), Abschn. 18.8.4 zu einem Teil aus Schubzulagen, d.h. "korb-, leiter- oder girlandenartigen Schubbewehrungselementen, die die Biegezugbewehrung nicht umschließen", besteht, ausreichende Sicherheit unter Brandbeanspruchung aufweisen. Dazu wurden sieben Normbrandversuche an symmetrischen Zweifeld-Balken, entworfen nach DIN 4102 für F 90, durchgeführt, bei denen sich herausstellte, daß bei ungünstigem M/Q-Verhältnis mit verfrühtem Versagen gerechnet werden muß, wenn beim Entwurf der Balken die durch die Normen gestatteten Möglichkeiten

- hoher Schubzulagenanteil nach DIN 1045 (1978)
- geringe Balkenbreite nach DIN 4102 (Teil 4, 1980)

ausgenutzt werden. Verringerung des Schubzulagenanteils und/oder Vergrößerung der Balkenbreite verbessern das Brandverhalten, jedoch konnten noch keine Grenzen abgesteckt werden.

Es dürfte aus Gründen wirtschaftlichen Arbeitsablaufs und Materialeinsatzes nicht im Interesse der Praxis sein, den zulässigen Anteil der Schubzulagen gegenüber den Umschließungsbügeln zu verkleinern, die Angabe einer erforderlichen Mindest-Balkenbreite würde dagegen keine empfindliche Einschränkung der Möglichkeiten bedeuten, da die Anordnung von Schubzulagen ohnehin erst bei Balken gewisser Breite interessant ist (bei schmalen Balken behindern Schubzulagen den Betoniervorgang beträchtlich).

Aufgrund der hier und in Teil I-III der Forschungsaufgabe gewonnenen Erkenntnisse werden folgende Empfehlungen gegeben:

Für die Feuerwiderstandsklassen F 30 und F 60 bestehen gegen die Verwendung von leiterartigen Schubzulagen in Balken von mindestens 250 mm Breite keine Bedenken.

Für Balken der Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 werden in DIN 4102 Teil 4 (1980) mindestens vierschnittige Bügel gefordert. Es besteht u.E. kein dringendes Bedürfnis, diese Forderung etwa bei besonders breiten Balken zu lockern, bei denen auch unter Verwendung von Schubzulagen ein ausreichendes Brandverhalten nicht ausgeschlossen sein dürfte. Die Forderung so hoher Feuerwiderstandsklassen wird so selten gestellt, daß die derzeitigen Auflagen hinsichtlich der Schubbewehrung solcher Balken auch in wirtschaftlicher Hinsicht vertretbar sind.

Es werden jedoch Ergänzungsversuche für die wichtigste Feuerwiderstandsklasse F 90 dringend benötigt. Zunächst sollte mit der Praxis abgestimmt werden, von welcher Balkenbreite an das Konstruieren mit Schubzulagen sinnvoll und wirtschaftlich ist. Mit einer so gefundenen Mindestbalkenbreite wären dann Balken zu konzipieren und im Normbrandversuch zu testen, bei denen jeweils der größtmögliche Anteil der Schubbewehrung aus Schubzulagen besteht, und zwar müßten dann nicht nur leiterartige Elemente, wie sie bisher ausschließlich verwendet wurden, sondern auch korb- und girlandenartige Schubzulagen untersucht werden.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wird zu gegebener Zeit einen entsprechenden Finanzierungsantrag an das Ministerium für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen stellen.

Ein weiterer Versuchskörper, Balken 8, diente zur Untersuchung, ob bei I-Balken, deren Steg keine Umschließungsbügel, sondern nur eine einschnittige Schubzulage aufweist, ausreichendes Schubverhalten unter Brandbeanspruchung gegeben ist. Da für eine solche Ausbildung nach DIN 1045, Abschnitt 18.8.4 die obere Begrenzung mit  $t = 80$  mm festgelegt ist, nach DIN 4102 Teil 4 (1980) für die geringste Feuerwiderstandsklasse F 30 eine Mindeststegbreite  $t = 80$  gefordert wird, war im Rahmen dieser Forschungsarbeit nur diese eine Stegbreite zu untersuchen. Es ergab sich im Normbrandversuch eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit, und es ist nicht erforderlich, bei so konstruierten I-Balken Einschränkungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit im Sinne von DIN 4102 zu formulieren.

### **3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen.**

- 3.1 Welche Empfehlungen können für die weitere Normungsarbeit bzw. hinsichtlich Ergänzung oder Änderung bestehender Normen, Richtlinien und dgl. gegeben werden ?**

Nach Durchführung einiger ergänzender Untersuchungen (s.2) können Empfehlungen für die Aufnahme von Balken, deren Schubbewehrung aus Bügeln und Schubzulagen besteht, in den Katalog der DIN 4102 Teil 4 gegeben werden.

- 3.2 Erscheinen weitere Arbeiten zur Abklärung offengebliebener Fragen, die mit den durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang stehen, erforderlich und welche Arbeiten sind besonders vorrangig ?**

Für Balken, die der Feuerwiderstandsklasse F 90 gemäß DIN 4102 Teil 2 genügen sollen, sind Ergänzungsversuche, die vorher mit der Praxis abzustimmen sind (s.2), notwendig.

- 3.3 Welche Folgerungen können für die Baupraxis aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden; hierbei ist auf bestehende Richtlinien besonders Rücksicht zu nehmen ?**

Bei Stahlbetonbalken mit ungünstigem Momenten-Schub-Verhältnis ist keine ausreichende Schubsicherheit unter Brandbeanspruchung gegeben, wenn die durch die einschlägigen Normen gestatteten Möglichkeiten

- hoher Schubzulagenanteil nach DIN 1045 (1978)
- geringe Balkenbreite nach DIN 4102 Teil 4 (1980)

bei der Konstruktion ausgenutzt werden.